Conseil national de recherches Canada
National Research Council Canada

Division de l'énergie
Division of Energy

Programme d'énergie solaire
Solar Energy Program

(Available in English)

L'énergie solaire du Canada - Mars 1986

J.P. Rollefson

Mai 1986

Canada

CNRC n° 25714

87-04621/

Ce projet a reçu l'appui du Comité (fédéral interministériel) de la recherche et du développement énergétiques (CRDE).

This project was supported by the Federal Panel on Energy R&D (PERD).

Copyright 1987 par
Conseil national de recherches du Canada

De courtes citations et la reproduction de figures et tableaux du présent rapport sont autorisées sous réserve que la source en soit clairement mentionée.

Copyright 1987 by
National Research Council of Canada

Permission is granted to quote short excerpts and to reproduce figures and tables from this report, provided that the source of such material is fully acknowledged.

Des exemplaires du rapport et d'autres publications de la Division de l'énergie peuvent être obtenus par courrier sur le paiement d'avance des droits requis (règlement par mandat de banque, mandat-exprès, mandat-poste ou chèque payables au Receveur général du Canada, crédit du CNRC) à l'adresse suivante:

Bureau de vente et diffusion des publications
Conseil national de recherches du Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0R6

Copies of this and other publications of the Division of Energy may be obtained by mailing the appropriate remittance (a Bank, Express, or Post Office Money Order, or a cheque made payable to the Receiver General for Canada, credit NRC) to

Publication Sales and Distribution Office
National Research Council of Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0R6

Prix unitaire: Gratuit

Price: Free

Available in English, NRCC No. 25713

L'ENERGIE SOLAIRE AU CANADA - MARS 1986

par

J.P. Rollefson
Programme d'énergie solaire
Division de l'energie
Conseil national de recherches

MAI 1986

TABLE DES MATIERES

	Page
RESUME	vii
1. INTRODUCTION	1
2. LA RESSOURCE SOLAIRE DU CANADA	3
2.1 Etat de l'évaluation de la ressource solaire au Canada	3
3. LE SOLAIRE ACTIF	5
3.1 Le solaire actif dans la perspective internationale	5
3.2 Réalisation canadiennes en solaire actif	10
3.2.1 Programmes d'ordinateur de simulation	10
3.2.2 Techniques de monitoring	11
3.2.3 Amélioration des performances	13
3.2.4 Progrès en matière de fiabilité et de normes	14
3.2.5 L'innovation technique au Canada	17
3.3 L'économique du solaire actif au Canada	20
3.3.1 Analyse économique du solaire actif actuel	21
3.3.2 Aspects économique du potentiel de développement du solaire actaif	23
4. LE SOLAIRE PASSIF	27
4.1 Le solaire passif dans la perspective internationale	27
4.2 Les réalisations canadiennes en solaire passif	28
4.2.1 Performance énergétique et lignes directrices en matière de conception	29
4.2.2 Programme de la superfenêtre	35
4.3 L'économique du solaire passif au Canada	37
4.3.1 Analyse économique du solaire passif actuel	37
4.3.2 Aspects économiques du potentiel de développement du solaire passif	39
5. LE PHOTOVOLTAÏQUE	42
5.1 Le photovoltaïque dans la perspective internationale	42
5.2 Réalisations canadiennes dans le photovoltaïque	45
5.3 L'économique du photovoltaïque	46
6. CONCLUSIONS	50
7. SOURCES D'INFORMATION ADDITIONNELLE	52
7.1 La ressource solaire	53
7.2 Technologie du solaire actif	54
7.3 Technologie du solaire passif	55
7.4 Technologie du photovoltaïque	56

LISTE DES FIGURES

		Page
1.	Thermosiphon solaire protégé contre le gel	6
2.	Schéma du monitoring de la première phase des essais des systèmes solaires d'ECD	12
3.	Schéma du plus récent monitoring des systèmes solaires d'ECD	12
4.	Rendement mensuel de deux systèmes solaires d'ECD	14
5.	Rendement thermique d'un capteur à tube sous vide mesuré pour différents éclairements expérimentaux	16
6.	Rendement thermique d'un capteur solaire plan à fluide caloporteur ébullition/condensation et à condenseur intégré	16
7.	Courbes d'entrée/sortie du capteur classique à tube sous vide	16
8.	Capteur à ébullition/condensation à condenseur intégré	18
9.	Ventilation du coût des systèmes solaires d'ECD	22
10.	Ventilation du coût d'un capteur plan de pointe	23
11.	Ventilation du coût d'un système solaire de pointe à vocation industrielle	23
12.	Grand capteur, monté sur place, à vocation industrielle	26
13.	Courbes saisonnières d'utilisation solaire et données réelles pour cinq emplacements	30
14.	Fraction de chaleur achetée saisonnière	30
15.	Variations de température dans l'espace-soleil au CNRC	31
16.	Schéma d'un système californien de thermopompage pour un copropriété immeuble	34
17.	Rendements énergétiques d'immeubles en copropriété classique et efficace	34
18.	Transfert de la chaleur à travers un vitrage multiple, pour différents espacements	36
19.	Transfert de la chaleur à travers un vitrage multiple, pour différentes options	37
20.	Variation de la consommation d'énergie d'une maison en fonction de l'orientation des fenêtres	38
21.	Consommation d'énergie en fonction de la fenestration sud, pour fenêtres à double vitrage et pour deux rapports vitrage/cadre	38
22.	Bilan énergétique net pour différents types de vitrage à à Ottawa	39
23.	Supplément de coût justifiable pour différents types de vitrage à Ottawa	39
24.	Effet de la résistance thermique de la fenestration sud sur la consommation d'énergie d'un immeuble	40
25.	Evolution du coût des modules photovoltaïques	43
26.	Evolution de la production des modules photovoltaïques	43

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1. Seuils de coût pour la pénétration du marché canadien . 20

Tableau 2. Objectifs techniques à long terme du gouvernement l'industrie aux Etats-Unis, en dollars américains fédéral et constants de 1982 44

RÉSUMÉ

Le présent document donne quelques grandes lignes des progrès récents réalisés en matière de mise au point des techniques d'exploitation de l'énergie solaire au Canada. Il comprend une brève étude des ressources solaires elles-mêmes. Les activités de mise au point de systèmes actifs, de systèmes passifs et de systèmes photovoltaïques sont présentées dans des chapitres distincts. Une évaluation économique des techniques basée sur la situation canadienne est aussi présentée. Des trois types de systèmes solaires envisagés, on conclut que les systèmes passifs, au sens large de systèmes basés sur l'utilisation de fenêtres à rendement supérieur et sur la gestion efficace de l'énergie des immeubles, sont ceux qui permettront le mieux de répondre à la demande énergétique canadienne à court et à moyen termes.

L'ENERGIE SOLAIRE AU CANADA - MARS 1986

J.P. Rollefson

1. INTRODUCTION

Aiguillonnés par la crise du pétrole de 1973-1974, de nombreux pays industrialisés ont consacré d'importantes ressources au développement de l'énergie solaire. Les Etats-Unis, en instituant un important programme de recherche-développement et des dégrèvement fiscaux, prirent rapidement le départ. Cela créa une poussée spectaculaire de l'activité commerciale reliée au solaire, notamment dans la technologie du solaire actif. Le Canada devait, de façon pressante, décider s'il allait mettre sur pied sa propre industrie solaire ou s'en remettre plutôt aux Américains en important leur technologie.

En 1978, le gouvernement du Canada décida de créer une industrie canadienne. Il annonça l'institution du Programme d'aide aux fabricants de matériel solaire, du Programme d'achat et d'utilisation d'équipement solaire et d'un programme accéléré de recherche-développement que coordonnerait le Projet d'énergie solaire du Canada. Le premier de ces programmes (AFMS) devait aider 10 compagnies choisies à passer à la fabrication industrielle de produits du domaine solaire actif. Le deuxième (AUES) devait contribuer à créer un marché pour ces produits au moyen d'un fonds de financement pouvant atteindre 125 millions de dollars répartis sur cinq ans. Le choix d'une politique d'acquisition gouvernementale plutôt que d'incitation avait pour motif de faire assumer par la collectivité le risque élevé d'échec associé à une technologie débutante. En conséquence, la politique solaire canadienne fut, dès le commencement, fortement influencée par la situation créée aux Etats-Unis et par le désir d'obtenir les "avantages industriels maximaux" indiqués dans l'énoncé général de politique énergétique de 1975.

Après un examen complet, on décida en 1983 de mettre un terme au programme AUES. Bien que le programme eût réussi à susciter dans le secteur privé de l'intérêt pour la production d'équipement solaire, on ne trouva jamais de justification pour dépenser les montants qui avaient été annoncés. De plus, en 1983, la fiabilité de la technologie solaire s'était améliorée suffisamment pour qu'il y eût lieu d'organiser un programme de démonstration incitant le public et les gens d'affaires canadiens à acheter des produits du secteur solaire actif. Le gouvernement mit de l'avant un nouveau programme de cinq ans dont l'objectif principal était de rendre l'industrie canadienne du solaire autosuffisante et capable d'offrir des produits à un prix intéressant. Ce programme était doté d'un fonds de 79 000 000 $ à affecter à la recherche-développement et aux démonstrations.

En novembre 1984, le nouveau gouvernement décida qu'il était impératif de procéder, dans tous les secteurs, à des réductions de dépenses. On mit fin au Programme d'énergie solaire du Conseil national de recherches et il y eut réduction des fonds reçus par l'entremise du ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources. Une rationalisation de l'industrie solaire a eu lieu depuis. Le fait que le programme de démonstration puisse fournir un marché substantiel aux firmes qui se sont maintenues est un élément positif de cette situation.

Les produits canadiens sont, à l'heure actuelle, équivalents ou supérieurs à bien des égards à ce que peut offrir la technologie internationale. Il n'est pas irréaliste de penser obtenir quelques avantages industriels, principalement par des ventes aux Etats-Unis. On croit cependant que le solaire actif ne jouera aucun rôle majeur dans le déplacement d'énergie au Canada avant l'an 2000.

Comme le laisse entendre la présente introduction, la technologie du solaire actif a dominé jusqu'à maintenant le financement et les priorités du gouvernement en matière d'énergie solaire. Cela n'a pas empêché le programme de recherche-développement en solaire passif de progresser sérieusement. Un prolongement de la recherche-développement dans les secteurs les plus prometteurs identifiés par le programme du solaire passif peut avoir d'importantes répercussions sur la consommation d'énergie traditionnelle au Canada. Dans le secteur photovoltaïque le programme canadien de recherche-développement n'a pas eu l'ampleur des programmes des Etats-Unis, du Japon et de l'Europe; sur les bases modestes de sa recherche, le Canada ne peut espérer jouer qu'un rôle secondaire dans ce domaine au cours des années qui viennent.

Les trois secteurs de la technologie solaire - l'actif, le passif, le photovoltaïque - ont des caractéristiques et des applications distinctes et ont évolué diversement. Les sections qui suivent les étudient séparément. Mais, faison d'abord un bref survol de la ressource solaire du Canada.

2. LA RESSOURCE SOLAIRE DU CANADA

Pour comprendre comment l'énergie solaire peut en même temps être gratuite et difficile à exploiter de façon rentable, il est nécessaire de comprendre la nature de la ressource solaire. L'énergie solaire est dispersée. Au Canada, il faut trois jours de rayonnement solaire moyen sur une surface de 1 m^2 pour obtenir l'équivalent énergétique de 1 L de pétrole. L'énergie solaire est intermittente. Il faut ou bien l'ajouter en appoint à une source principale d'énergie ou bien mettre en place un important dispositif de stockage d'énergie. Comme l'hiver présente à la fois les plus faibles intensités de rayonnement et les plus basses températures, il est encore plus difficile, alors, de recueillir l'énergie solaire de façon efficace.

La ressource solaire du Canada n'est pas négligeable pour autant. Le rayonnement annuel global va de 5,2 GJ/(m^2·a) à Lethbridge à 4,6 GJ/(m^2·a) à Toronto, et 4,0 GJ/(m^2·a) à Saint-Jean. Ces valeurs sont comparables à celles de l'Europe et du nord des Etats-Unis. Une surface de captage de 4 ou 5 m^2 suffit pour suppléer à la moitié des besoins en eau chaude de la famille canadienne type. Le rayonnement solaire pénétrant par les fenêtres peut facilement fournir de 20 à 25 % des besoins de chauffage d'une maison.

2.1 Etat de l'évaluation de la ressource solaire au Canada

Le système utilisé au Canada pour l'évaluation de la ressource solaire est un des plus perfectionnés qui soient. Un réseau de 50 stations disséminées partout dans le pays enregistre par observation directe le rayonnement horizontal. On a mis au point un modèle, appelé MAC.3, dont la fonction est d'évaluer le rayonnement horaire global et ses composantes (rayonnement direct et diffus) et d'étendre le jeu de données à 129 emplacements. On a mis au point des techniques de conversion de l'information sur le rayonnement direct et diffus et sur la réflexion terrestre en valeurs de rayonnement pour les surfaces inclinées.

On a rassemblé de façon commode les données observées ou estimées, de sorte qu'on peut les utiliser à toute une gamme de fins. En particulier, on a enregistré sur ruban magnétique à neuf pistes les valeurs horaires du rayonnement solaire, des températures et de la vitesse du vent, pour une période de 10 ans. On a constaté que les valeurs horaires de rayonnement global mesurées étaient précises à 5 %, erreur que l'on peut, par le calcul de moyennes, réduire à 2,5 %. Comme la précision des pyranomètres n'est que de 2 %, on voit qu'il serait difficile d'accroître davantage la qualité des données. Si l'on compare les données mesurées avec les valeurs estimées à partir des modèles, on constate que la marge d'erreur des quantités dérivées est généralement inférieure à 10 %. En somme, la précision des données de rayonnement est parfaitement suffisante pour l'évaluation de la performance solaire.

Par l'entremise de l'Agence internationale de l'énergie, le Service de l'environnement atmosphérique (SEA) fait en sorte que ses connaissances en modélisation et en instrumentation (pyranomètres, en particulier) contribuent aux autres efforts du Canada, tout en se tenant informé des plus récents développements à survenir ailleurs.

3. LE SOLAIRE ACTIF

3.1 Le solaire actif dans la perspective internationale

Un système actif est constitué de composants distincts ayant pour fonction de recueillir, de transporter et de stocker l'énergie et utilise de l'énergie et des commandes auxiliaires pour transporter la chaleur vers la charge selon les besoins. Les commandes servent à placer le système en appoint par rapport à un système de chauffage ordinaire. Cette compatibilité du système actif avec les installations existantes et le fait qu'on a vu là une simple extension de la technologie existante du chauffage et du refroidissement en ont rapidement fait l'élément central du programme de plusieurs pays. De plus, des pays comme Israël et le Mexique exerçaient déjà une importante activité commerciale dans le domaine au moment où l'intérêt pour la question est devenu mondial, au milieu des années soixante-dix.

Mais on avait sous-estimé la rigueur des conditions d'utilisation des systèmes solaires et la plupart des programmes de développement accéléré ont vite connu des problèmes de fiabilité et de durabilité. Il s'est révélé spécialement difficile de réaliser à un prix raisonnable la protection des systèmes contre le gel. Un système simple à thermosiphon peut encore coûter le quart ou la moitié de ce que coûte un système vidangeable totalement à l'épreuve du gel.

A l'heure actuelle, on a dans une large mesure surmonté les problèmes de fiabilité et de durabilité - quoiqu'il existe encore aux Etats-Unis des problèmes dus au fait que l'on trouve sur le marché des systèmes médiocres ou qui ne fonctionnent pas. La recherche est dirigée vers l'amélioration du rapport coût-efficacité par la simplification des systèmes et la mise au point de produits moins chers et susceptibles de créer des économies d'échelle grâce à la production en grande quantité.

La conception des systèmes et leurs performances sont grandement dépendantes des fonctions pour lesquelles on les crée. Un système pour piscine peut être extrêmement simple car il ne fait que chauffer l'eau à une température légèrement supérieure à la température ambiante et est vidangé à l'approche de la période de gel. Le système de chauffage d'eau domestique pour climat tempéré sans danger de gel est un peu plus complexe. Dans ce type de climat favorable, on peut atteindre une performance de 3 $GJ/(m^2 \cdot a)$. On peut obtenir d'excellents résultats avec le principe du thermosiphon dans un petit système d'usage commercial; pour un système de plus grandes dimensions, il devient préférable de se tourner vers une installation à circulation forcée. La performance est inversement proportionnelle à la

température recherchée; une performance de 4 GJ/(m^2·a) est possible pour le préchauffage à très basse température, alors que 2 GJ/(m^2·a) constituent une bonne performance pour une température de l'ordre 80 à 90°C. Pour qu'un système de production d'eau chaude pour usage domestique ou de chauffage à des fins industrielles ou commerciales atteigne de bons résultats, il faut qu'il soit conçu en fonction de la charge et que celle-ci soit constante tout au long de l'année.

Dans les climats où il ne gèle qu'occasionnellement, on peut réaliser de bonnes adaptations du système à thermosiphon. La figure 1 offre une vue schématique d'un tel système. Elle met en évidence la combinaison de facteurs qui favorisent la viabilité économique de l'installation.

Le système de production d'eau chaude domestique utilisant le principe du thermosiphon constitue certainement une des solutions les plus rentables là où le climat permet de l'utiliser. Une unité semblable à celle de la figure 1 peut se vendre au détail environ 1300 $ en Australie. Au Japon, il

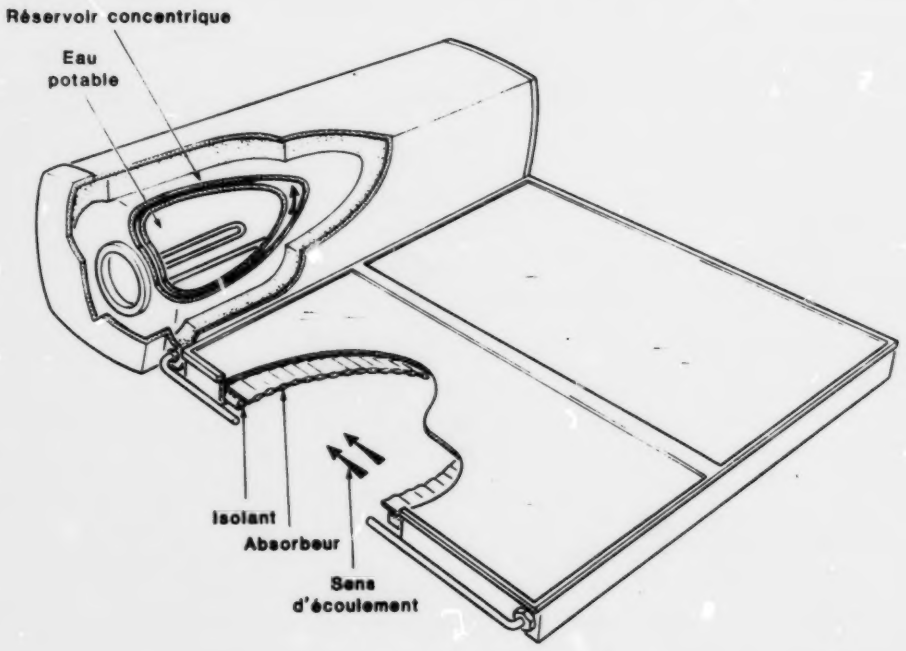


Figure 1. Thermosiphon solaire protégé contre le gel (vaguement inspiré du système Solarhart 300 LJ).

se vend actuellement 500 000 systèmes à thermosiphon par année à un prix de détail de 850 $, installation comprise.[1]

Dans l'ordre de complexité vient ensuite le système vidangeable de production d'eau chaude domestique, abondamment utilisé aux Etats-Unis à la fin des années soixante-dix. Pendant les périodes où aucun gain solaire n'est possible, ce système isole le capteur de la pression des tuyaux en activant une soupape à solénoïde, ce qui a pour effet de provoquer le vidange du capteur. Malgré les améliorations importantes que l'on a pu réaliser, l'étendue du dommage pouvant résulter d'une seule défaillance pendant toute la durée du système continue de limiter l'intérêt de cette approche, spécialement pour des climats comme celui du Canada.

Le pas suivant de protection contre le gel consiste à isoler la boucle du capteur de la canalisation d'eau potable, en utilisant soit un système à antigel en circuit fermé, soit un système vidangeable. Le système à antigel demeure une solution applicable aux systèmes commerciaux ou industriels où l'on dispose de façon continue d'un service d'entretien, mais les besoins d'entretien de ce système semblent être trop grands pour le propriétaire de maison moyen. Comme le coût d'une seule visite d'un technicien est aussi élevé que les économies annuelles rendues possibles par le système, on comprend facilement que cette solution soit en perte de popularité.

Le système à réfrigérant fait certains progrès dans les climats septentrionaux. On réalise la protection contre le froid en n'utilisant pas d'eau dans la canalisation extérieure. Le capteur agit normalement comme un évaporateur et la transmission de la chaleur vers le réservoir de stockage se fait par l'entremise d'un condenseur. Les systèmes de ce type utilisent généralement une source extérieure. Outre qu'il est à l'épreuve du gel, ce type de système offre la possibilité d'utiliser de l'aluminium pour l'absorbeur et les petites canalisations flexibles reliant le capteur au dispositif de stockage. Par contre, son installation exige beaucoup de soins si l'on veut que le système soit parfaitement étanche et ne contienne aucun gaz non condensable.

Non seulement elle rend nécessaire la protection contre le gel, mais la variation saisonnière de la quantité d'ensoleillement et de la température aux principales latitudes du Canada a un effet sur la performance des systèmes et sur la fraction solaire optimale que l'on peut en obtenir. S'agissant du préchauffage de l'eau industrielle à très basse température, on peut obtenir au Canada une performance de 3 GJ/(m^2·a); un bon système

---

[1] Sauf indication contraire, les sommes sont en dollars canadiens.

solaire de production d'eau chaude domestique (ECD) peut atteindre de 1,5 à 2,0 GJ/(m^2·a) s'il est bien dimensionné. Un système d'ECD doit pouvoir suffire à 50 % de la demande, à cause de l'importance du coût fixe associé à un système de cette taille. Cependant, au delà d'une fraction solaire d'environ 65 %, la surface supplémentaire de captage n'est utilisée totalement qu'en hiver. La décroissance du rendement se reflète directement dans une réduction de la performance solaire par unité de surface.

L'accroissement de coût lié à une protection totale contre le gel est considérable. Le coût d'un de ces systèmes est de 3000 $ à 4000 $ (US) aux Etats-Unis et de 3000 $ au Canada pour un système de 4 à 5 m^2. Une ventilation complète du coût, donnée ci-après à la section traitant de l'économique, expliquera la raison de cet état de choses.

L'utilisation du solaire actif pour le chauffage des locaux se bute à un problème évident créé par le défaut de correspondance entre la disponibilité solaire et les besoins de chauffage. Le seul choix possible devient la mise en place d'un système très peu coûteux donnant une petite fraction solaire, ou le recours au stockage saisonnier de l'énergie. Les recherches ont montré que le stockage saisonnier, en vue d'utiliser l'hiver l'énergie solaire de l'été précédent, ne s'est révélé économiquement faisable que dans des zones très limitées, certaines parties de la Suède, par exemple. Ici, l'existence de quelques réseaux de chauffage urbain permet d'envisager des systèmes de stockage souterrain de très grandes dimensions. Les systèmes de grande taille sont économiques du fait que la déperdition de chaleur est fonction du carré de la dimension alors que le stockage de la quantité de chaleur est fonction du cube de la dimension.

Le solaire actif à liquide et à stockage de courte durée est trop coûteux pour retenir l'attention pour le chauffage des bâtiments; par contre on installe encore aux Etats-Unis, pour le chauffage des maisons, des systèmes à air. Au Canada, toutefois, ce type de système n'a à peu près jamais été installé, les études plutôt concluantes du Conseil national de recherches ayant montré qu'il n'était pas économique. Non seulement la quantité d'énergie produite est-elle faible, environ 1 GJ/(m^2·a), mais l'utilisation de l'air semble poser beaucoup de problèmes puisqu'il fait faire circuler environ 3440 fois plus d'air que d'eau pour transporter la même quantité d'énergie à difference de température égale et que, conséquemment, les conduits sont de grandes dimensions et coûteux à isoler et à rendre étanches.

Comme on utilise moins de matériaux dans les capteurs à air que dans les capteurs à liquide, le captage proprement dit peut demeurer peu coûteux dans le cas des premiers. Si le système de transport peut rester extrêmement simple, l'utilisation de l'air peut alors présenter de l'intérêt; p.

ex., un système mural simple convient bien pour le préchauffage de l'air de ventilation des grands espaces intérieurs. Dans les climats tropicaux, l'utilisation d'un système à air pour le séchage des récoltes peut être intéressant si l'on en a besoin pendant une partie importante de l'année.

Pour atteindre des hautes températures on procède généralement par concentration, car, même si le recours aux capteurs à évacuation peut être raisonnablement efficace, les pertes associées au transport à haute température deviennent vite considérables. La réflexion sur axe unique au moyen de réflecteurs paraboliques constitue une première étape vers la réalisation de températures de 80 à 120°C; les températures nécessaires à la production d'énergie électrique exigent des réflecteurs (héliostats) qui concentrent la lumière sur un récepteur central. Comme ces systèmes ne peuvent utiliser que la composante directe (et non la composante diffuse) du rayonnement, leur utilisation, en pratique, est limitée aux régions désertiques. La conception d'héliostats peu coûteux utilisant des polymères en pellicule mince à permis récemment de réaliser des progrès mais cela n'est pas suffisant pour donner un élan commercial important à cette voie de recherche. Dans le cas du grand récepteur central français, le coût de fonctionnement à lui seul dépasse les recettes créées par l'électricité.

En définitive, c'est dans la fourniture d'eau chaude domestique que l'industrie du solaire actif à atteint le plus de maturité, l'activité se concentrant dans un petit nombre de pays parmi lesquels on retrouve Israël, l'Australie, le Japon, le Mexique et les Etats-Unis. Au Japon, des prêts à faible taux d'intérêt (5,5 % et 5 ans pour l'habitation, 6,5 % et 10 ans pour le commerce) constituent le principal facteur de promotion des ventes; en effet, même dans les cas où le prix de l'électricité domestique est de 0,084 $/kWh, le prix du solaire est encore deux fois trop élevé pour être attrayant sans assistance. Aux Etats-Unis, des dégrèvements d'impôt généreux ont contribué de façon extrêmement importante à la réalisation de ventes de solaire actif approchant le milliard de dollars par année. Au Canada, la production de capteurs était de 77 000 m^2 en 1983 et on a prévu qu'elle passerait à 85 000 - 95 000 m^2 en 1984, ce qui correspond environ à 6 % de la production américaine (1 500 000 m^2) pour la même année.

A cause de l'échelle de son activité commerciale, le marché américain du solaire actif est, à court terme, d'une extrême importance sur la scène internationale. Il semble maintenant que les Etats-Unis mettront fin progressivement aux dégrèvements d'impôt au cours des trois prochaines années. Une importante rationalisation de l'industrie américaine est à prévoir. La vente des produits peu efficaces ou coûteux devrait décliner de façon abrupte et les technologies perfectionnées prendre une plus grande part d'un marché considérablement réduit.

3.2 Réalisation canadiennes en solaire actif

3.2.1 Simulation par ordinateur

Les données sur la ressource solaire indique quelle est la quantité d'énergie qu'offre le soleil. La simulation par ordinateur indiquent quelle est la quantité d'énergie qu'on peut espérer prélever et utiliser. On a consacré des efforts considérables au perfectionnement de ces logiciels, cela pour deux raisons :

(a) ils indiquent les niveaux de performance que l'on peut atteindre selon les types d'utilisation;

(b) ils permettent d'étudier l'effet des différents composants sur la performance d'ensemble, contribuant ainsi à la conception de systèmes ou à l'identification de priorités pour la recheche-développement.

Le plus important ensemble de logiciels de simulation qui existe au Canada est WATSUN de l'Université de Waterloo. Les domaines d'application de ces logiciels sont le chauffage des eaux de traitement industrielles et commerciales, le chauffage des piscines et la fourniture d'eau chaude domestique. Il existe des choix qui permettent de simuler la plupart des systèmes d'échange thermique, tel le reservoir entouré d'un deuxième reservoir, le système à serpentin immergé ou entourant un reservoir, l'échangeur thermique externe. En matière de réservoir de stockage, on a le choix entre le type à mélange total et le type stratifié. On peut tenir compte des déperditions par la tuyauterie et de certains effets de capacité thermique. On a incorporé au WATSUN le modèle de caractérisation du captage le plus récent et le plus précis, spécialement utile dans le cas des systèmes à tube vide ou à ébullition- condensation.

Des essais ont permis d'attribuer à WATSUN une précision allant de 5 à 15 %. Toute erreur plus considérable peut presque toujours être attribuée au mauvais choix des paramètres, au mauvais fonctionnement du système ou à des ennuis constatés tels que l'accumulation de neige sur les capteurs.

La principale faiblesse du WATSUN consiste dans le fait qu'il ne peut simuler les effets transitoires (ses possibilités pour les études de contrôle sont donc limitées) étant donné qu'il est basé sur l'hypothèse d'un état de régime quasi-continu et que les données météorologiques et les données de charge qu'il utilise sont des valeurs horaires moyennes. Dans certaines occasions (mais rarement), la simulation a été impossible il a fallu recourir à des périodes plus courtes pour la bonne caractérisation globale des systèmes.

Le WATSUN est d'usage facile et donne des résultats de simulation plutôt que des approximations corrélatives. La plupart du temps, ses résultats sont semblables à ceux de TRNSYS, de telle sorte que l'on n'a besoin de recourir à celui-ci que lorsque des sous-composants ou des éléments transitoires spéciaux sont importants pour une étude de performance. On peut avoir accès à WATSUN par l'entremise d'un service aux utilisateurs situé à l'Université de Waterloo. Il en existe une version pour micro-ordinateur et on peut consulter un registre d'années météorologiques typiques pour 31 endroits au Canada et 36 aux Etats-Unis.

Le logiciel Syphon, auquel on peut aussi avoir accès par l'entremise du service aux utilisateurs de WATSUN, est une adaptation pour les systèmes à thermosiphon. Des comparaisons avec des résultats d'essais ont montré qu'il donne une bonne estimation de la performance des thermosiphons quoique, selon l'utilisation qui en est faite actuellement, il tende à surévaluer cette performance de 5 à 15 % environ.

3.2.2 *Techniques de monitoring*

Pour ce qui est des systèmes d'eau chaude domestique, on a entrepris au Centre d'essai de systèmes solaires d'ECD (eau chaude domestique) du CNRC un programme de monitoring de plus de deux ans dont l'objet est l'évaluation comparée de divers systèmes. Les valeurs quotidiennes moyennes de rayonnement, l'énergie solaire captée et l'énergie auxiliaire utilisée ont été portées sur des tableaux, dont on s'est servi pour améliorer la simulation par WATSUN et identifier les systèmes les plus prometteurs. On a aussi utilisé ces données pour comparer la performance annuelle réelle avec un essai de "jour standard" proposé dans la norme F379.1 de l'Acnor comme étant un bon moyen de déterminer une performance globale. Les premiers résultats sont encourageants car l'écart entre les niveaux de performance projetés et les valeurs réelles est inférieur à 10 %.

Le monitoring le plus récent (voir aux figures 2 et 3 la comparaison entre cette méthodologie et celle qui l'a précédée) effectué au centre d'essai a été de niveau supérieur, car on a utilisé une échelle de mesure du temps plus fine et une série de sondes de températures placées dans le réservoir de stockage pour mieux décrire les caractéristiques de l'énergie stockée. Cette technique améliorée de monitoring permet une évaluation beaucoup plus rapide des facteurs critiques de la performance. Une fois que, grâce à cette méthode, on a bien décrit les caractères d'un système, les simulations permettent de faire une bonne évaluation de sa performance annuelle.

Dans le cas des utilisations commerciales ou industrielles, des opérations de monitoring de haut niveau effectuées sur des installations réelles ont révélé certains problèmes (par exemple l'obstruction des échangeurs

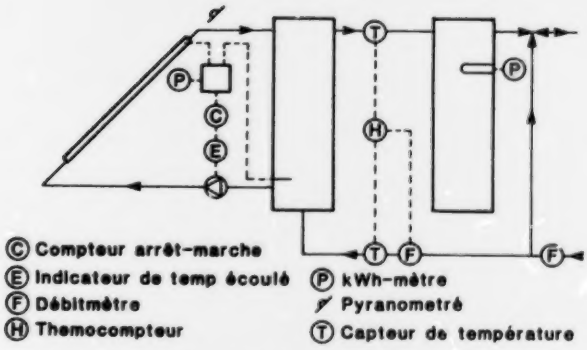


Figure 2. Schéma du monitoring de la première phase des essais des systèmes solaires d'ECD (d'après la figure 3, S.B. Beale et B.E. Sibbet, "Monitoring of Solar Domestic Hot Water Systems at the National Research Council of Canada", Actes d'Intersol 85, juin 1985).

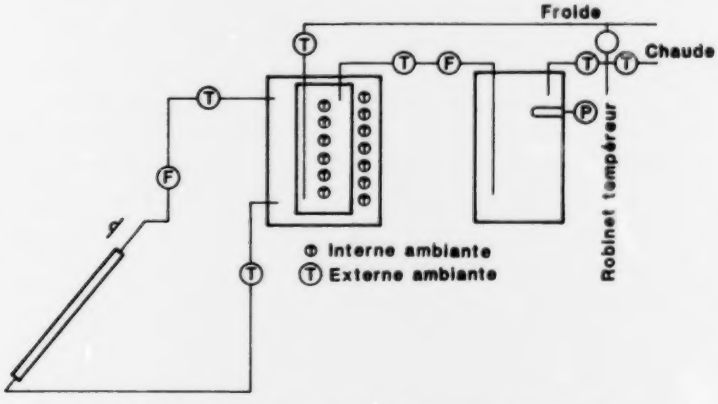


Figure 3. Schéma du plus récent monitoring des systèmes solaires d'ECD.

thermiques) et amélioré notre connaissance de l'importance relative de certains effets, connaissance qui a été intégrée dans les programmes de simulation.

Un aspect du monitoring en situation réelle demeure important. Les caractéristiques de charge données dans les études de conception pour utilisations de type CETIC (chauffage d'eau de traitement industriel ou commercial) se sont, beaucoup trop souvent, révélées très erronées. Comme la conception et la performance d'un système dépendent de façon critique de ces données sur la charge, un monitoring de la charge réelle devrait précéder l'installation du système.

Après une mise en service complète, la plupart des systèmes devraient n'avoir besoin que d'un thermomètre intégré. Les conceptions innovatrices en matière d'essais initiaux en situation réelle devraient cependant tirer profit d'une formule de mise en service récemment mise au point, qui permet de comparer sur le terrain les résultats réels et les résultats simulés.

En conclusion, les techniques de monitoring solaire se sont beaucoup perfectionnées ces dernières années. On dispose maintenant d'équipements fiables et d'une bonne technologie. Le monitoring de haut niveau et l'analyse de données sur le terrain qui en résulte se sont révélés très coûteux (ceux que le Canada a effectués en guise de contribution à la tâche VI du programme de chauffage et de refroidissement solaire de l'IEA ont coûté environ 1 000 000 $) et n'ont pas besoin d'être répétés. L'information fournie par les opérations de monitoring a servi à améliorer le programme de simulation WATSUN. Pour ce qui est des systèmes d'ECD, les modes d'utilisation et leur influence sur la performance des systèmes sont bien compris. L'évaluation des nouvelles idées et des nouveaux produits peut se concentrer sur l'utilisation d'essais de laboratoire à court terme et en profondeur combinés avec l'analyse par simulation.

3.2.3 *Amélioration des performances*

La principale amélioration dans la performance du solaire actif au cours des six dernières années a consisté à atteindre les niveaux de performance que la simulation avait originalement permis d'espérer. De mauvaises surfaces sélectives, des échangeurs thermiques trop petits, des tuyauteries causant une déperdition thermique excessive sont autant de raisons, parmi d'autres, pour lesquelles les premières performances ont été inégales. Un monitoring suivi a été l'instrument d'une quantification claire des aspects négatifs de certaines solutions et a déclenché les efforts grâce auxquels on a pu trouver des solutions.

Les études de monitoring du CNRC ont montré que les diverses configurations de systèmes d'ECD peuvent donner des performances similaires si l'on accorde quelque attention à la conception. Chaque cas a toutefois ses particularités. La figure 4 montre comment deux systèmes ayant des capteurs, des superficies et des volumes identiques peuvent fournir des performances différentes. Le système le plus performant est un système à thermosiphon, alors que l'autre est un système à circulation forcée muni d'un échangeur thermique trop petit.

La figure 4 montre également à quel point le juste dimensionnement d'une installation d'ECD est important. Un système à fraction solaire annuelle de 0,55 à 0,60 satisfait déjà 100 % des besoins au cours des mois les plus chauds de l'été. Si l'on veut obtenir une fraction solaire plus élevée, les dimensions du capteur seront telles que pendant l'été une partie de la

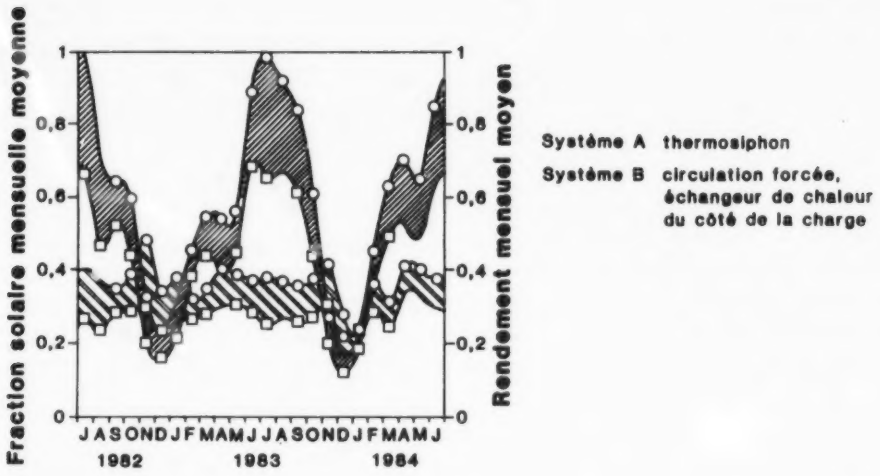


Figure 4. Rendement mensuel de deux systèmes solaires d'ECD (d'après la figure 6, S.B. Beale et B.E. Sibbett, "Monitoring of Solar Domestic Hot Water Systems at the National Research Council of Canada," Actes d'Intersol 85, juin 1985).

chaleur sera rejetée. Ce type de problème a fait surface au cours de certains essais en situation réelle exécutés dans les provinces Maritimes, des installations ayant été surdimensionnées parce qu'on avait surestimé la consommation d'eau chaude des familles.

L'importance du choix d'utilisations appropriées est aussi devenu évident à la suite des essais de systèmes de CETIC effectués au CNRC. Au cours de ces essais, plusieurs des systèmes ne fournissaient que 1 GJ/(m^2•a) alors qu'ils auraient théoriquement dû en produire 2 GJ/(m^2•a) ou plus. Dans quelques cas les études énergétiques du projet solaire ont montré que de nombreux modes de récupération de la chaleur étaient économiquement attrayants. Avec la récupération de la chaleur, la température du système solaire fut relevée considérablement et la production d'énergie chuta en conséquence. Les fabricants et les installateurs commencèrent à chercher des créneaux où une grande demande de basse température ne pouvait pas être satisfaite facilement par la récupération de la chaleur. Dans ces conditions, les résultats obtenus expérimentalement au CNRC ont montré que l'on peut fournir plus de 3 GJ/(m^2•a).

3.2.4 Progrès en matière de fiabilité et de normes

La fiabilité des systèmes solaires actifs s'est considérablement améliorée au cours des sept dernières années. Lors d'une étude d'évaluation datée de 1979 et portant sur la technologie dont on disposait au Canada dans le secteur de l'ECD solaire, un seul fournisseur se révéla capable d'installer un système raisonnablement opérationnel. Les autres installations se

détraquèrent : réguliers défectueux, fuites, gel des conduits, pannes de pompes, etc. L'étude d'évaluation permit de conclure qu'un développement considérable de la technologie était nécessaire. On aurait pu en venir essentiellement à la même conclusion à la suite de l'expérience faite en 1979-1982 dans le secteur de CETIC.

Depuis 1979, la recherche-développement et l'expérience ont permis à l'industrie d'identifier les composants défectueux. On a conçu de nouveaux systèmes de façon à éviter l'utilisation de ces composants (par exemple des purgeurs), à utiliser des produits mieux choisis (par exemple des pompes) ou à mettre au point des produits nouveaux (par exemple des accessoires de régulation, des capteurs). Les techniques d'installation se sont perfectionnées. Des cours parrainés par l'Association canadienne des industries solaires ont été donnés partout au Canada et de bons textes ont été rédigés en collaboration avec le CNRC.

On a acquis une meilleure compréhension des avantages et inconvénients relatifs de divers types de systèmes. Le système d'ECD à glycol en circuit fermé à perdu de sa popularité, son entretien se révélant trop complexe pour le propriétaire moyen.

Il s'est fait du travail en matière de normalisation, en collaboration avec d'autres organismes internationaux. Les essais actuels de durabilité et de performance sont semblables à ceux que l'on fait aux Etats-Unis. Les recherches du laboratoire de calorimètrie solaire du CNRC et du Centre national d'essai d'équipement solaire (CNEES) ont fait suggérer d'importantes modifications des essais de performance.

Si l'on fait des efforts spéciaux dans ce domaine, c'est que, à la suite d'essais, on s'est aperçu que les méthodes choisies pour ajuster la courbe d'efficacité des capteurs à la représentation HWB (Hottel-Whillier-Bliss) ne caractérisaient pas bien les systèmes à tube à vide et à ébullition-condensation. Les figures 5 et 6 font voir les effets de différents niveaux de rayonnement sur la performance. Si l'on utilise l'essai ASHRAE 93-77, les niveaux sont généralement de l'ordre de 900 W/m^2. La méthode ne recueille donc pas l'information essentielle aux autres niveaux. De plus, il se révèle difficile d'effectuer une bonne caractérisation à partir de la représentation HWB au moyen d'un petit nombre de mesures.

La figure 7 montre la représentation proposée récemment pour la norme canadienne des capteurs solaires, la norme ACNOR F378-M1982. La performance obtenue s'y présente comme étant fonction linéaire du rayonnement pour une différence de température donnée entre celle du fluide au point d'entrée et la température ambiante. Cela permet de prendre quelques mesures à deux niveaux de rayonnement et fournit une série de ΔT pour déterminer la

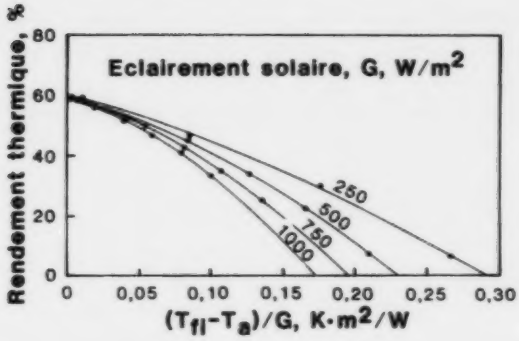


Figure 5. Rendement thermique d'un capteur à tube sous vide mesuré pour différents éclairements expérimentaux (d'après une figure de S.J. Harrison parue dans "The Effects of Irradiance Level on Thermal Performance Tests of Solar Collectors", Actes d'Intersol 85, juin 1985).

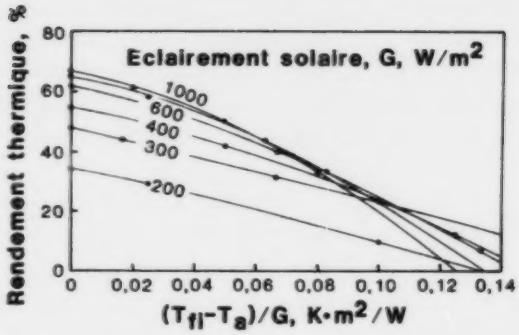


Figure 6. Rendement thermique d'un capteur solaire plan à fluide caloporteur ébullition/condensation et à condenseur intégré (d'après une figure de S.J. Harrison parue dans "The Effects of Irradiance Level on Thermal Performance Tests of Solar Collectors", Actes d'Intersol 85, juin 1985).

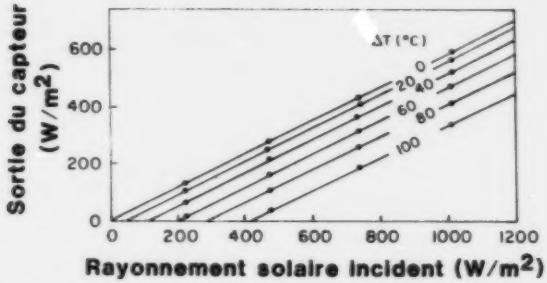


Figure 7. Courbes d'entrée/sortie du capteur classique à tube sous vide (d'après une figure de S.J. Harrison parue dans "The Effects of Irradiance Level on Thermal Performance Tests of Solar Collectors", Actes d'Intersol 85 juin 1985).

performance d'un capteur. L'équation générale, utilisable pour tous les cas, a la forme suivante :

$$N = (a + b\Delta T)(G - G_t)/G - c\Delta T/G - d(\Delta T)^2/G$$

où :

a, b, c, d et G_t (le seuil de rayonnement) sont des constantes du capteur étudié; N est l'efficacité du capteur: G est le rayonnement; ΔT est la

différence entre T_{fi} (la température du fluide du collecteur) et T_a (la température de l'air ambiant).

La nouvelle approche des essais est importante pour la technologie du tube à vide parce qu'elle permet d'estimer la performance avec plus de précision dans des conditions typiques. Elle est importante pour une autre raison dans le cas du capteur à ébullition-condensation. Les valeurs $F_R\tau\alpha$ et F_RU_L (l'intersection avec l'axe des y et la pente des courbes d'efficacité thermique) obtenues au moyen de l'essai ASHRAE 93-77 conduisent à une surestimation de la performance réelle. Comme on a noté une performance réelle moindre, on a souvent conclu à une défectuosité du capteur. Le réalisme de la caractérisation explique la différence entre les premières estimations et les résultats réels.

A la section sur le monitoring, il a été brièvement fait mention du travail, basé sur les normes ASHRAE-95-1981 et CSA F379.1, effectué sur l'essai de performance du système d'ECD. Des recherches additionnelles seront nécessaires pour que l'on puisse mieux comprendre les derniers résultats, mais il semble que l'essai peut être très utile. La plus mauvaise estimation de la performance comportait une erreur de 10 % et se rapportait à un système dont les caractéristiques étaient très particulières (grave cyclage marche-arrêt).

La création du Centre national d'essai d'équipement solaire constitue en elle-même une réalisation du programme solaire canadien. Les essais effectués au moyen de simulateur solaire intérieur se sont révélés en excellent accord avec les résultats extérieurs. L'installation intérieure permet des évaluations beaucoup plus rapides et la lampe ajustable du simulateur donne une portée nouvelle aux essais. En particulier, elle facilite grandement les mesures relatives à la nouvelle présentation du bilan de l'entrée et de la sortie de l'énergie. Le supplément de crédibilité acquis par les produits canadiens est un avantage important du programme d'essai du CNEES.

3.2.5 *L'innovation technique au Canada*

On a examiné beaucoup d'idées nouvelles ayant pour objet d'améliorer la compétitivité de l'énergie solaire; quelques-unes se sont révélées dignes d'une recherche plus poussée ou d'un développement commercial.

Le principe du capteur à ébullition-condensation à condenseur intégré remonte quant à lui, au tout début du programme accéléré de développement solaire. Ce capteur très spécial fait appel à un processus de transmission de la chaleur dont on savait peu de choses avant la recherche solaire. La figure 8 illustre les principes pertinents. Les ailettes de l'absorbeur,

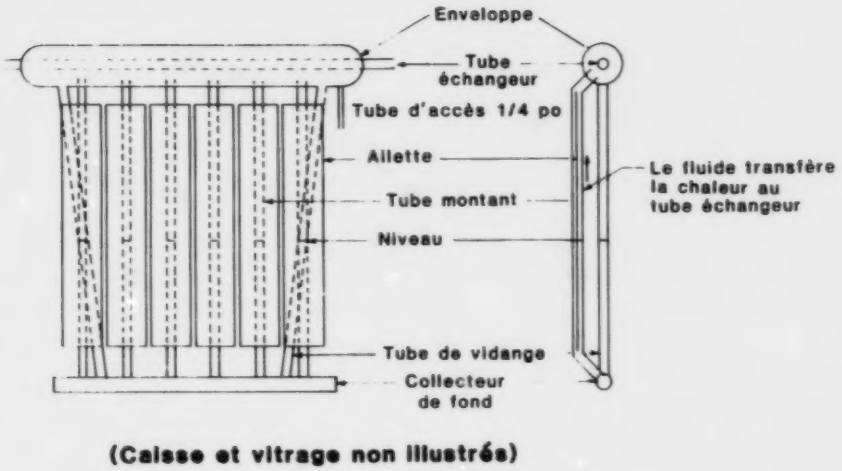


Figure 8. Capteur à ébullition/condensation à condenseur intégré (inspiré du capteur Norsun).

chauffées par le soleil, transmettent la chaleur à des tubes montants contenant une solution aqueuse de propylène-glycol sous sa propre pression de vapeur. La chaleur provoque l'ébullition du liquide, et les bulles qui s'élèvent revêtent la totalité du tube d'un mince film, ce qui favorise l'ébullition et la transmission de chaleur. Le mélange gaz-liquide s'échappe du sommet des tubes et est dirigé vers un tuyau collecteur interne où se produit une transmission de chaleur sensible combinée à un changement de phase. Le liquide condensé retourne à la base du capteur par un tuyau raccordé au collecteur externe.

Il a fallu résoudre plusieurs problèmes sérieux pour aboutir aux résultats concrets que l'on obtient aujourd'hui. Dans les premières réalisations, il se produisait un surchauffage du liquide avec l'ébullition. Cela réduisait la transmission de chaleur. On a donc ajouté un point de noyautage pour que l'ébullition commence le plus tôt possible. On s'est aperçu que des contaminants, sous la forme de gaz non condensables, nuisaient beaucoup à la performance, ce qui a fait conclure à la nécessité d'une fabrication plus soignée. Des études d'optimisation ont permis de donner les valeurs voulues à la concentration de la solution, aux pressions, au diamètre du tube montant et à la configuration géométrique du collecteur.

Tout cela a eu pour but l'exploitation de deux grands avantages de ce type de capteur. Tout d'abord, celui-ci constitue une diode thermique. Il transmet bien la chaleur de l'absorbeur chauffé par le soleil vers le système de distribution. Par ailleurs, le vide partiel qui entoure le tube interne du collecteur isole un absorbeur froid du système de distribution, ce qui facilite grandement la protection contre le gel.

La simplification du système de distribution est un autre avantage de ce principe. Le fluide circule uniquement dans le tube interne du collecteur et non dans la plaque d'absorption du capteur. Il y a réduction de la perte de pression et les canalisations de retour et de marche arrière ne sont plus nécessaires dans le cas des assemblages. Le principe du tuyau de chaleur (utilisé dans un des capteurs à tube à vide) offre les mêmes avantages que le capteur à diode thermique. Seuls les perfectionnements que l'on pourra apporter à chacun de ces systèmes de transmission de la chaleur détermineront lequel sera le plus rentable. Voici quelques autres innovations canadiennes dans le secteur du solaire actif.

- Jusqu'à récemment les raccords entre capteurs groupés étaient peu coûteux mais avaient tendance à fuir, ou étaient efficaces mais coûteux. Dans la première catégorie on trouve les raccords à bride; dans la seconde, les raccords à soufflets métalliques. La recherche d'une solution efficace et peu coûteuse a finalement abouti à la conception d'un court tube de laiton muni d'un gros joint torique central et de joints toriques additionnels à chaque bout. Il s'agit là d'un produit canadien nouveau et encore inconnu, dont l'usage devrait se répandre rapidement en raison de ses avantages évidents.

- On sait que l'utilisation de surfaces sélectives - qui absorbent bien le rayonnement solaire mais dont la ré-émission dans l'infrarouge est faible - constitue l'un des moyens les plus efficaces d'améliorer le captage du rayonnement solaire. Les techniques de production canadiens pour l'application de ces produits sur des substrats de cuivre ou d'aluminium comptent parmi les plus perfectionnées du monde. Des compagnies canadiennes se trouvent parmi les plus importants fournisseurs de plaques d'absorption à surface sélective pour l'industrie américaine des capteurs.

- Utiliser de l'énergie solaire pour l'éclairage n'est pas une idée nouvelle, mais pour l'utiliser en profondeur à l'intérieur d'un bâtiment il fallait inventer le tuyau à lumière. Celui-ci se fonde sur la réflexion interne totale aux grands angles d'incidence pour réaliser la transmission de la lumière à faible perte. La caractéristique technique clé de ce procédé est le très fin réseau prismatique du bord extérieur de la surface du tuyau de plastique. Les applications tendent actuellement à se spécialiser, comme l'éclairage d'espaces dangereux où la source de lumière doit être placée à l'extérieur de l'espace de travail. Une utilisation plus générale viendra, spécialement pour les espaces où la charge de refroidissement est élevée et où il est préférable de placer la source de lumière (qui produit aussi une quantité considérable de chaleur) à l'extérieur de l'espace climatisé.

3.3 L'économique du solaire actif au Canada

Le Canada est doté de toute une gamme de ressources énergétiques à des prix qui sont parmi les plus bas du monde. Il est utile de convertir ces prix en chiffres des performances économiques indiquant la possibilité de pénétration du marché des nouvelles sources d'énergie. La tableau 1 donne des valeurs de seuil, en coût initial par unité d'économie annuelle d'énergie, dont la représentativité est aussi étendue que possible. Le coût de certains types d'énergie - l'électricité dans les provinces Maritimes, par exemple - est plus élevé, d'autres sont plus bas, spécialement en ce qui concerne le gaz naturel, mais ces seuils sont encore le reflet de buts raisonnables si l'on a pour objectif la pénétration d'un marché étendu.

On a avancé que les coûts du solaire actif devaient être mis en balance avec certains manques à gagner de caractère social. Les coûts environnementaux de l'utilisation des combustibles fossiles sont difficiles à quantifier, aussi le gouvernement a-t-il basé ce manque à gagner, dans le cas du mazout et du gaz, sur la perte des profits que ferait réaliser l'exportation de l'énergie. Mais le prix domestique du mazout est actuellement supérieur au prix mondial : par exemple, 0,31 $/L équivaut à 35 $US le baril. Par conséquent, pour ce qui est de ces deux combusitble, les systèmes solaires devraient viser à se mettre en concurrence ouverte sur le marché canadien. Dans le cas d'électricité, certains soutiennent que le

Tableau 1. Seuils de coût pour la pénétration du marché canadien[1]

Type de marché	Critères économiques	Seuil : $/(GJ·a^{-1})
Marché du bâtiment neuf à usage résidentiel ou commercial, plus marché des innovateurs dans le résidentiel	Les économies d'énergie compensent simplement l'accroissement, causé par l'investissement dans un système solaire, de l'emprunt à rembourser	90-120
Marché résidentiel ou commercial en général	Secteur résidentiel : récupération en 5 ans Secteur commercial : récupération en 3 ans	50-55
Fourniture d'énergie	Récupération en 3 ans	30

[1]Les calculs sont basés, pour l'électricité, sur des prix de 0,045 $/kWh pour le secteur résidentiel, de 0,051 $/kWh pour le secteur commercial et de 0,0275 $/kWh pour le secteur industriel. Le prix équivalent du mazout, à 65 % d'efficacité de conversion thermique, est de 0,31 $/L (ce qui est inférieur à la plupart des prix qui existent sur le marché canadien); le prix du gaz naturel est de 0,31 $/m^3 (ce qui est supérieur aux prix actuels). Le prêt hypothécaire est basé sur un taux de rendement réel de 6 %, remboursement en 10-15 ans. Pour le calcul des périodes de récupération dans le cas des applications industrielles de type CETIC, on a tenu compte de la classe 34 des règlements de l'impôt sur le revenu, qui permettent l'amortissement rapide (en 3 ans) de certains investissements dans des projets reliés à l'énergie renouvelable et à l'économie de l'énergie. Les seuils, dans les secteurs commercial et industriel, peuvent doubler, à peu près, lorsque, un degré élevé de confiance dans la fiabilité et la durabilité des produits ayant été atteint, on peut recourir au financement par un tiers.

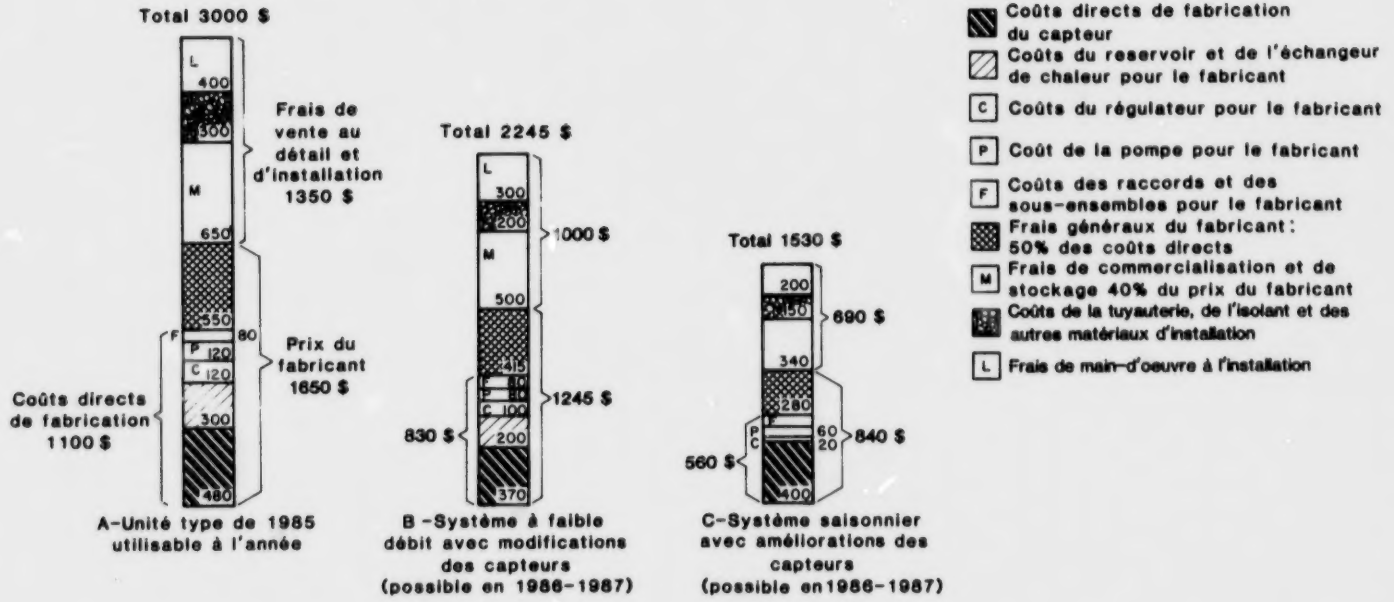
solaire ne devrait être en concurrence que pour le coût marginal de l'introduction d'électricité nouvelle. Dans sa forme actuelle, le solaire actif ne dispose toutefois que d'un crédit de capacité faible, sinon inexistant. Des études d'Hydro Ontario ont montré qu'une bonne pénétration du marché par l'ECD solaire aurait pour effet d'accroître le problème des pointes. C'est seulement lorsqu'on aura trouvé un mode de stockage saisonnier économique que le solaire actif pourra déplacer les coûts marginaux de l'électricité au Canada.

Le présent exposé sur l'économique du solaire actif n'a pas touché à des questions telles que la résilience. C'est peut-être sage au point de vue social d'entretenir un certain niveau d'activité de marché dans le secteur solaire pour favoriser le développement de l'industrie. En cas de rupture de l'approvisionnement en combustibles traditionnels, le solaire serait l'une des solutions de remplacement que l'on pourrait exploiter dans un délai raisonnable. Une discussion sur la valeur du solaire actif dans ce contexte déborderait le cadre de la présente étude. Néanmoins, on peut affirmer que les progrès récents de la technologie rendent l'entretien d'un marché limité beaucoup plus réalisable puisqu'il faut moins d'efforts pour intéresser le public au solaire. De plus, l'expérience acquise grâce à l'ensemble du programme de recherche-développement en énergie montre qu'il faut organiser bien à l'avance le développement de moyens d'approvisionnement de remplacement : en effet, les premières prédictions, optimistes, selon lesquelles de nouvelles sources pouvaient être mises rapidement en exploitation se sont révélées peu réalistes.

3.3.1 Analyse économique du solaire actif actuel

La première partie de la figure 9 donne la ventilation des coûts associés à l'installation d'un système d'ECD solaire perfectionné. La figure 10 donne la ventilation qui s'applique à la fabrication des capteurs seulement. Il s'agit d'un système vidangeable qui devrait fournir 10 GJ/a, pour une charge familiale moyenne de 225 L d'eau chaude par jour. Le prix de détail total de 3000 $, combiné avec le niveau de production du système, donne une performance économique de 300 $/(GJ$\cdot a^{-1}$). Sans subvention ou crédit d'impôt, ce chiffre est beaucoup trop élevé pour permettre une importante pénétration du marché au Canada ou ailleurs.

Du point de vue du coût, la meilleure performance que le solaire actif ait pu atteindre dans le secteur d'utilisation du CETIC se situe dans les applications à très basse température faisant appel à des petites surfaces de captage (de 50 à 100 m^2) du type utilisé pour le chauffage des piscines. La pisciculture offre un bon exemple des applications possibles, mais les utilisations de cette nature semblent être toutefois en nombre limité.



1. Des systèmes se sont vendus 2600 $, les fabricants ayant assumé les frais directs de commercialisation

Figure 9. Ventilation du coût des systèmes solaires d'ECD (Chiffres établis à partir de comptes rendus de travaux à forfait remis au CNRC. Une bonne synthèse est présentée dans "Upgrading of Solar Domestic Hot Water Packages" de E.W. Hoffman, juillet 1985).

Pour des charges plus élevées et des surfaces de captage plus grandes, le capteur au polymère perd ses avantages sur le capteur métallique à vitrage simple, étant donné que le taux d'écoulement exigé par le capteur au polymère occasionne des coûts de tuyauterie élevés. La figure 11 indique la ventilation du coût d'un système constitué d'un grand groupe de capteurs métalliques à vitrage simple. Une performance de 2 ou 3 GJ/(m^2•a) pouvant coûter de 130 à 195 \$/(GJ•a^{-1}), cette solution est loin d'être économiquement attrayante pour le moment.

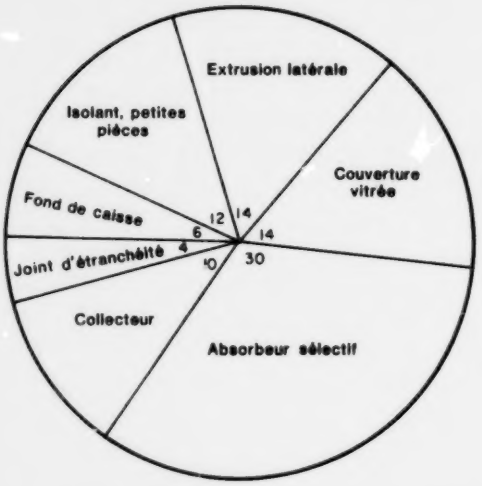


Figure 10. Ventilation du coût d'un capteur plan de pointe (chiffres établis à partir de comptes rendus de fabricant présentés au CNRC).

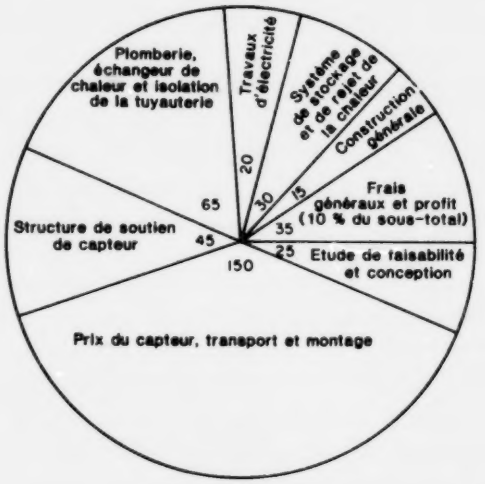


Figure 11. Ventilation du coût d'un système solaire de pointe à vocation industrielle (d'après des comptes rendus de travaux à forfait remis au CNRC).

3.3.2 Aspects économique du potentiel de développement du solaire actif

Quelques simplifications importantes pourraient encore être apportées à la conception des capteurs pour ECD. La boîte est actuellement trop coûteuse pour sa fonction, qui est de protéger l'absorbeur et de retenir la plaque de couverture. Le métal embouti remplace déjà l'aluminium extrudé dans quelques produits étrangers. On constate également des réductions de coût dans la technologie des plaques d'absorption. Les surfaces sélectives sur aluminium font concurrence, en raison de leur coût plus faible (2 ou 3 \$/m^2) aux surfaces sélectives sur cuivre (10 \$/m^2). Avec l'utilisation de modèles de flux lent, on peut éliminer le collecteur (header) et réduire le diamètre du tube montant en le disposant en serpentin. L'adoption de ces mesures est susceptible de réduire le coût direct à 60-70 \$/m^2 (contre 90-100 \$/m^2 en ce moment).

Le progrès enregistré dans la mise au point de revêtements polymériques résistants devrait permettre de réduire de façon substantielle le poids des capteurs, ce qui va non seulement diminuer le coût des matériaux mais rendre l'installation beaucoup plus facile. On met au point des structures en tension pour exploiter pleinement ces développements. Des recherches sur l'utilisation d'absorbeurs lamellés très légers sont en cours aux Etats-Unis. Cette approche exige cependant l'utilisation d'un régime de flux indirect à basse pression (un échangeur thermique sépare le circuit de captage de la source d'eau potable et de la pression des conduits principaux) qui réduit la possibilité de diminuer le coût du reste du système.

Les chercheurs se sont d'abord intéressés au principe du bas régime de flux en raison de son potentiel d'amélioration de l'efficacité des systèmes d'ECD. Plutôt que de faire circuler le fluide à travers le capteur pour élever la température de quelques degrés, on réduit le flux jusqu'au point où un seul passage dans le circuit de captage amène le fluide à la température désirée, soit 55°C dans des conditions ensoleillées. La haute température et le régime de flux lent rendent possible la stratification dans le réservoir de stockage, ce qui accroît l'efficacité du système.

Le système à flux lent réduit le coût des systèmes solaires d'ECD en permettant l'utilisation d'une tuyauterie de petit diamètre pour relier les capteurs au stockage. Comme la déperdition thermique est inversement proportionnelle au quotient du diamètre extérieur divisé par le diamètre intérieur de l'isolant qui enveloppe les tuyaux, l'utilisation de petits tuyaux permet de réduire les pertes de chaleur de façon très efficace par une quantité moindre d'isolant. La combinaison de tous ces facteurs devrait abaisser bientôt le coût des systèmes d'ECD à moins de 2300 $, soit une réduction de 20 %.

Le principe du flux lent a déjà été incorporé avec succès à un système saisonnier d'ECD vendu au Canada, qui combine de façon synergique ce principe avec celui du capteur à diode (la technologie du tuyau à chaleur pourrait aussi donner de bons résultats). On obtient d'importantes réductions de coût par l'élimination de l'échangeur de chaleur et du réservoir de stockage secondaire grâce à l'utilisation d'un contrôleur beaucoup plus simple, d'une pompe de circulation beaucoup plus petite et d'une simple tuyauterie souple. Cette approche rend possible un coût de 1500 $, installation comprise. Des essais faits au CNRC avec un système semblable indiquent que le fait de ne pas utiliser ce système d'ECD pendant les quatre mois les plus froids de l'hiver n'entraîne la perte que de 15 % de la production annuelle.

La remarquable synergie des deux principes mérite une description plus détaillée. Comme les pertes de chaleur causées par le collecteur (header) du

capteur sont faibles, on peut avoir recours au flux direct de l'eau potable et à une stratégie simple de régulation. Une minuterie installée sur la pompe de circulation est en marche aux heures de plus grande clarté. Si les conditions d'ensoleillement sont bonnes, le réservoir se remplit d'eau chaude. Par temps nuageux, l'eau venant du capteur pénètre dans le haut du réservoir et actionne le thermostat dont dépend l'élément de chauffage supérieur. Le réservoir se remplit graduellement d'eau chaude parce que l'eau circule lentement au-delà de l'élément supérieur.

Ce système solaire saisonnier d'ECD constitue l'un des systèmes les plus intéressants, du point de vue coût, que l'on puisse se procurer aujourd'hui. On pourrait en accroître l'attrait commercial en éliminant tout risque de défaillance catastrophique susceptible de résulter d'une mise en marche involontaire par temps très froid (la protection contre le gel est actuellement assurée par une soupape qui peut fonctionner bien au-dessous de 0°C).

Le système à réfrigérant, qui constitue une autre méthode de protection contre le gel, a été bien étudié au Canada. Des recherches qui permettraient de réduire les coûts sont actuellement en cours. L'utilisation accrue de l'aluminium, qui ne se corrode pas au contact du réfrigérant, amène une réduction du coût des matériaux. On peut mettre à profit le changement de phase du réfrigérant pour actionner une pompe automatique qui élimine la nécessité d'un contrôleur et réduit le coût de la pompe elle-même. La tuyauterie qui va aux capteurs et qui en revient peut être flexible et de petit diamètre. La combinaison de ces mesures devrait fournir un système très fiable pour moins de 2400 $.

La principale voie que l'on a adoptée pour réduire le coût des systèmes de CETIC de grandes dimensions a été de réaliser des économies d'échelle en assemblant à pied d'oeuvre des unités de captage modulaires. Le coût total d'une installation spéciale de démonstration est semblable à celui de capteurs individuels placés en groupe, mais il semble toujours possible d'en arriver, à force d'essais, à une réduction importante du coût. La figure 12 montre les éléments essentiels d'un grand capteur assemblé à pied d'oeuvre, dont les avantages sont indiqués ci-après.

1. L'accroissement du rapport entre la superficie nette de l'ouverture et la superficie brute et la réduction des pertes latérales entraînent une amélioration de 3 à 5 % environ de l'efficacité du capteur.

2. Des collecteurs (headers) placés aux extrémités des capteurs ont remplacé les collecteurs et interconnexions supérieurs et inférieurs des capteurs. L'économie nette est de l'ordre de 30 $/m^2.

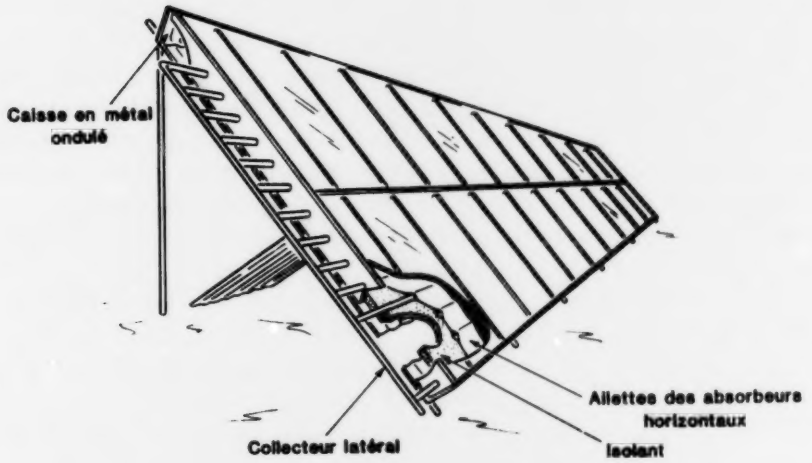


Figure 12. Grand capteur, monté sur place, à vocation industrielle (d'après des renseignements fournis par Petrosun Inc.)

3. La structure de support et la boîte du capteur sont intégrés et sont faits du même métal ondulé, peu coûteux. L'économie nette est de l'ordre de 50 $/m^2$.

4. La tuyauterie est grandement simplifiée par la création d'un axe central unique pour les canalisations principales d'amenée et de retour. Il n'y a pas de tuyau de retour à partir des extrémités opposées du groupe de capteurs. L'économie est de l'ordre de 10 $/m^2$.

5. Le coût d'installation est plus élevé car on doit faire appel à une main-d'oeuvre d'expérience à cause des nouveaux détails d'assemblage. Le coût additionnel est de l'ordre de 15 $/m^2$.

En résumé, une réduction de coût de l'ordre de 25-30 % semble possible dans le cas des grands systèmes solaires industriels faisant appel à des techniques d'assemblage à pied d'oeuvre. Cela exigera toutefois une expansion du marché qu'il est difficile d'envisager en ce moment. La mise au point de revêtements polymériques minces durables pourrait engendrer d'importantes réductions additionnelles du coût.

4. LE SOLAIRE PASSIF

4.1 Le solaire passif dans la perspective internationale

La technologie du solaire passif intègre le captage, le transport et le stockage de l'énergie dans la conception du bâtiment lui-même. Comme les techniques de construction varient considérablement d'un pays à l'autre et que les besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage naturel dépendent fortement du climat, l'architecture solaire passive tend à présenter des caractéristiques diverses selon les endroits.

Le principal avantage d'un système solaire passif consiste dans le fait que la plupart des composants ont une double fonction. Les fenêtres, par exemple, sont à la fois des capteurs et une partie de l'enveloppe du bâtiment, de telle sorte que le coût attribuable à la fonction solaire est faible. On peut atteindre, dans la conception d'une maison à ossature de bois, une contribution solaire de 20 à 25 % au chauffage, sans augmenter le coût de construction. Ce qui retarde l'utilisation du solaire passif, c'est l'absence de modèles tout prêts et le manque d'information des constructeurs et du public. Le principe de ce type de maison consiste à mettre à profit l'énergie solaire au moment où elle est présente. Si l'on veut atteindre une fraction solaire plus grande, il faut stocker davantage d'énergie diurne pour utilisation la nuit, sinon il se produit un inconfortable surchauffage de la maison.

Dans le sud-ouest des Etats-Unis ou dans des pays comme la Grèce, on peut recourir à l'approche "masse-et-verre" pour obtenir une fraction solaire élevée. A l'instar des anciennes constructions en adobe, les bâtiments dans lesquels on retrouve une masse thermique importante (pierre, maçonnerie en grande quantité) permettent d'adoucir les fortes variations de température jour-nuit propres aux climats secs. La popularité acquise par cette approche est attribuable autant à l'agrément du style de vie qu'on y associe (espaces ouverts et bien éclairée, plantes vertes) qu'à la possibilité d'économiser l'énergie.

Dans l'état actuel de la technologie et dans un climat septentrional comme celui du Canada, le meilleur parti, dans la conception d'une maison à ossature de bois, semble être de prendre la contribution solaire de 20 % immédiatement disponible et à chercher ensuite à améliorer les économies d'énergie. Pour obtenir cette fraction solaire, il ne s'agit pas d'augmenter la superficie de fenestration, mais bien de mettre l'accent sur la fenestration sud et de la faire donner sur les grandes pièces de la maison.

Les autres possibilités qui s'ajoutent au système à gain direct dont il vient d'être fait mention sont les systèmes à gain indirect comme le mur

Trombe et les systèmes à gain isolé comme le solarium. Ces deux stratégies ont pour objectif un meilleur contrôle de la température de l'espace central de séjour. En climat froid, le mur Trombe n'a qu'un potentiel très limité car le stockage de chaleur se fait tout près de la fenêtre, partie de l'enveloppe par laquelle la chaleur se dissipe le plus facilement. Dans le système à gain isolé, on a simplement déplacé le problème du surchauffage. Le solarium ne peut devenir habitable qu'au prix d'un effort sérieux de régulation de la température. Un solarium considéré comme une simple source de chaleur est un capteur très coûteux.

Des fenêtres dotées d'une résistance thermique élevée et un stockage efficace du surplus de chaleur diurne sont les éléments clés du succès des systèmes à gain direct dans les climats septentrionaux. Dans le sillage des grandes multinationales, l'industrie commence à offrir des produits améliorés qui offrent le plus souvent une résistance thermique égale ou supérieure à celle d'une fenêtre à triple vitrage. La recherche, au Canada, se place au premier rang des efforts qui sont faits pour doter la prochaine génération de "superfenêtres" d'une résistance thermique encore plus élevée. La recherche de systèmes de stockage rentables n'a pas encore donné les résultats espérés, mais des progrès modestes ont été réalisés dans l'utilisation des matériaux à changement de phase.

On a tendance à identifier presque exclusivement le solaire passif avec le secteur résidentiel. Une gestion appropriée de l'énergie, jointe à des caractéristiques passive hybrides, peut toutefois réduire la consommation d'énergie traditionnelle dans les bâtiments commerciaux. (On qualifie de "passifs hybrides" des systèmes intégrés faisant usage d'énergie d'appoint, habituellement pour améliorer le transport du chauffage et du refroidissement). Dans le cas des immeubles à bureaux de grande hauteur en climat chaud, les charges d'éclairage et de climatisation dominent et l'accent est mis sur la réduction de ces charges dans la conception de la fenestration. Pour ce type d'application, des produits comme le tuyau à lumière présentent un potentiel intéressant. En climat froid, le chauffage devient l'élément important, spécialement pour ce qui est des bâtiments à mur-rideau vitré. On met l'accent sur le transport des gains de la zone sud vers la zone nord au moyen de systèmes perfectionnés de gestion de l'énergie.

4.2 Les réalisations canadiennes en solaire passif

Le but ultime des programmes de solaire passif et d'économie d'énergie est le même : réduire de manière économique la consommation d'énergie dans les bâtiments. Les deux programmes cherchent à atteindre ce but par l'intégration de diverses caractéristiques dans la construction même des bâtiments. Dans chaque programme, on doit constamment évaluer les progrès faits dans

l'autre pour en déterminer les impacts sur les priorités de la recherche et pour choisir les voies les plus valables économiquement.

Même dotés de toutes ces similitudes, le passif solaire et l'économie d'énergie se sont, au Canada, développés distinctement et d'une façon sainement compétitive. L'économie d'énergie s'est concentrée sur des pratiques de construction simples - accroissement des niveaux d'isolation, continuité des pare-vapeur - pour comprimer les coûts. Le programme solaire passif a quantifié les contributions solaires possibles, cherché des solutions technologiques à l'amélioration de la performance des fenêtres et étudié la question de la gestion totale de l'énergie dans le bâtiment. Le passif solaire au Canada doit donc être compris dans un sens très large.

4.2.1 Performance énergétique et lignes directrices en matière de conception

Quoique de conception simple, les systèmes solaires passifs sont compliqués à analyser et des données détaillées provenant d'un monitoring de haut niveau sont nécessaires à la vérification des algorithmes proposés pour la prédiction des performances énergétiques. Un monitoring de haut niveau effectué sur une série de huttes inhabitées, dotées de caractéristiques solaires passives différentes et situées sur le terrain du CNRC, a fourni des données dont la qualité est telle qu'elles ont été largement utilisées, par l'entremise de l'Agence internationale de l'énergie, pour vérifier les prédictions de performance de plusieurs modèles de simulation. On continue d'analyser certaines de ces données dans le but d'établir des algorithmes prédisant les délais de surchauffage des systèmes directs et la performance énergétique des systèmes à gain isolé (solariums).

L'analyse des systèmes à gain direct a permis la mise au point de méthodes simples de prédiction de la performance énergétique. Les données sur le rayonnement solaire et sur la transmission des vitrages révèlent les gains solaires réalisés au cours d'une saison de chauffage. La fraction utile de ce gain (le facteur d'utilisation solaire de la figure 13) est fonction du rapport masse-gain solaire, du rapport gain solaire-charge totale et de la variation de température que l'utilisateur est disposé à accepter (0, 2,75 ou 5,5°C). La charge moins le produit du gain solaire par le facteur d'utilisation donne la fraction de chaleur achetée (figure 14).

Les courbes du facteur d'utilisation se révèlent valables pour un grand nombre d'endroits au Canada. A la figure 13, on relève un léger écart pour Vancouver, où les courbes surestiment le facteur d'utilisation réel (mais même dans ce cas l'erreur dans la fraction de chaleur achetée n'est généralement que de 6 %). Cela résulte de ce que le rapport masse-gain est défini à partir du gain solaire moyen par jour. Le climat maritime de Vancouver présente, en hiver, une distribution de très peu de jours ensoleillés pour

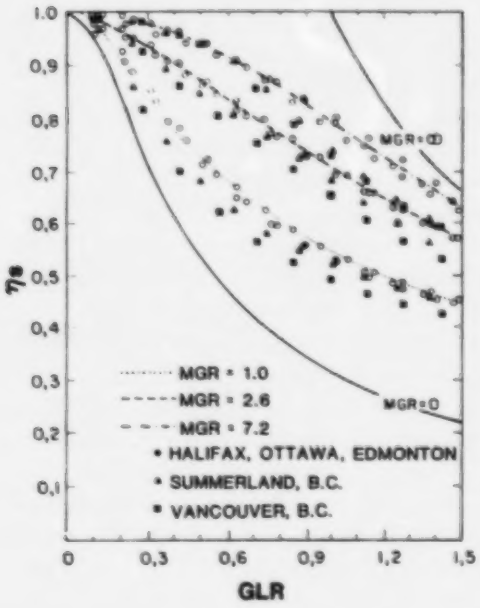


Figure 13. Courbes saisonnières d'utilisation solaire et données réelles pour cinq emplacements (d'après une figure de S.A. Barakat et D.M. Sander parue dans "Utilisation of Solar Gain Through Windows for Heating Houses", Building Research Note No. 184, Conseil national de recherches, Ottawa, mars 1982).

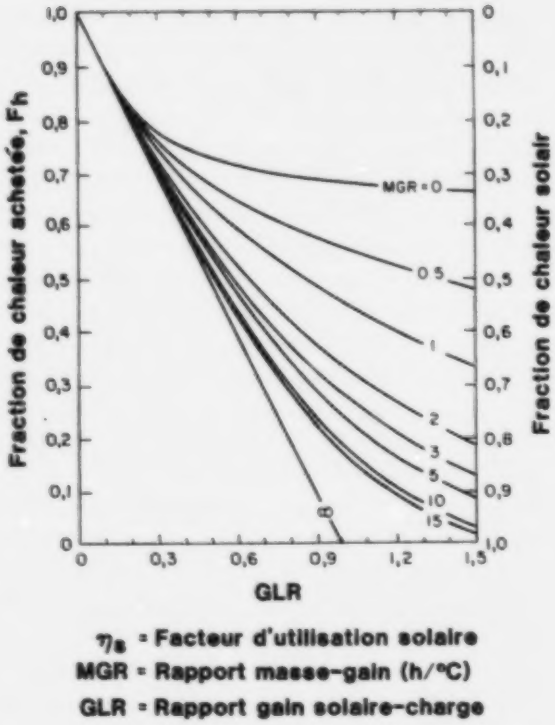


Figure 14. Fraction de chaleur achetée saisonnière (d'après une figure de S.A. Barakat et D.M. Sander parue dans "A Simple Method for Determining the Heating Requirements of Direct-Gain Passive Solar Houses", Building Research Note No. 195, Conseil national de recherches, Ottawa, septembre 1982).

une grande quantité de jours nuageux, de telle sorte que la relation entre le gain d'un jour ensoleillé et le gain d'un jour moyen n'est pas la même que dans la plupart des autres villes du Canada.

Ces recherches sur la conception solaire passive ont permis de comprendre que, pour ce qui est de la construction à ossature de bois au Canada et si l'on veut réduire au minimum la consommation d'énergie, la superficie de la fenestration sud doit demeurer modeste. Une maison solaire passive, au Canada, n'a pas plus de superficie de fenestration qu'une maison traditionnelle. La seule différence se trouve dans le fait que l'on prend l'orientation en considération et que l'on place les fenêtres au sud plutôt qu'à l'ouest et au nord.

L'Institut de recherche en construction (autrefois la Division de la recherche en bâtiment) analyse encore certains des résultats du monitoring

d'un espace-soleil attenant à un bâtiment et de la transmission de chaleur de cet espace vers le bâtiment. L'information dont on dispose déjà est suffisamment convaincante pour que les concepteurs remettent en question cette approche, du moins comme moyen important de capter et d'utiliser l'énergie solaire. La plupart des gens qui font l'acquisition d'un solarium cherchent avant tout une certaine amélioration esthétique de leur qualité de vie par l'utilisation d'un espace ouvert et bien éclairé. Ce n'est qu'en second lieu qu'ils s'intéressent à l'économie d'énergie. Si l'on veut atteindre le premier de ces buts, la température du solarium doit être tempérée, pour que celui-ci soit habitable une grande partie de l'année. Mais les grandes surfaces vitrées que l'on trouve dans ces espaces présentent presque toujours un gain net de chaleur très élevé durant le jour et une déperdition de chaleur très élevée durant la nuit, de sorte qu'il est difficile à la fois d'obtenir les bonnes températures d'utilisation et de réaliser l'efficacité énergétique. Ces buts peuvent être atteints, mais uniquement par une conception très soignée.

La figure 15 montre les variations de température dans l'espace-soleil à faible masse installé sur le terrain du CNRC. La surface nette de plancher y est de 16,3 m^2 et la surface de vitrage, de 9,9 m^2. De toute évidence, une très faible utilisation de cet espace était possible dans des conditions de température aussi rigoureuses. L'addition, lors d'expériences postérieures, d'une importante quantité de masse thermique à l'intérieur de l'espace a contribué à en améliorer l'habitabilité, mais cette solution est loin de suffire. Une bonne ventilation est aussi une condition préalable.

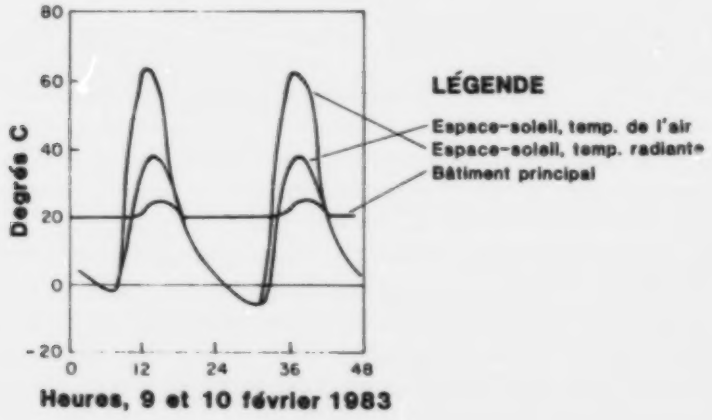


Figure 15. Variations de température dans l'espace-soleil au CNRC (d'après une figure de K. Ruberg parue dans "NRCC's Sunspace and Direct Gain Test Facility : Thermal Performance During 1982-83 Heating Season", Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches, Ottawa, n° 1320, août 1984, CNRC 24950).

Lors des expériences, on a utilisé la convection assistée par des ventilateurs pour transmettre la chaleur de l'espace-soleil vers le bâtiment principal. Cela ne semble pas avoir été très efficace. Alors que l'espace-soleil a réalisé un gain solaire de 38 % supérieur à celui du système de gain direct de référence, la quantité de chaleur transmise au bâtiment principal ne représentait que 50 % de la performance du système à gain direct. L'espace-soleil réduisait toutefois de 40 % la déperdition de chaleur du bâtiment, de telle sorte que le chauffage d'appoint de l'ensemble du bâtiment principal et de l'espace-soleil n'était que de 75 % de celui qu'exigeait le bâtiment à gain direct. Dans ce cas, la réduction de la déperdition de chaleur était plus considérable que le gain solaire. Si l'on maintenait la température de l'espace-soleil au-dessus d'un minimum pendant la nuit, le besoin de chauffage dépasserait de beaucoup ces réductions de la perte de chaleur.

On a soumis à un monitoring de niveau B un certain nombre de solutions solaires passives qui, en général, cherchent à accroître la contribution solaire passive au chauffage par le transport des gains solaires diurnes vers une masse thermique, pour utilisation nocturne. Certaines utilisent les lits de pierre. La capacité technique de réaliser des lits de stockage efficaces par la solution des lits de pierre existe, comme l'ont montré des études détaillées menées dans ce domaine. Grâce à cette méthode et à d'autres, on a réussi à modérer les variations de température mais l'expérience ne se révèle pas économique si l'on compare l'énergie économisée avec les coûts additionnels associés au stockage de l'énergie.

Encore une fois, la conclusion globale pour la construction résidentielle est que, dans l'état actuel de la technologie, le solaire passif ne peut contribuer que de façon modeste à la réduction de la consommation d'énergie. Pour ce qui est du solarium, cela signifie que l'on ne devrait utiliser que la superficie de fenestration nécessaire pour obtenir les niveaux d'éclairement désirés. Si l'on veut éviter le surchauffage en été et réduire les coûts, les fenêtres verticales orientées vers le sud sont la solution à choisir. Il peut être intéressant d'ajouter après coup un espace-soleil à une porte de terrasse, de façon à réduire la déperdition de chaleur par la porte. De même façon, un vitrage installé entre le solarium et la maison donne de l'éclairage et de la chaleur solaire à la maison sans autant de pertes que si le vitrage est directement exposé aux conditions extérieures. La construction de l'espace-soleil lui-même n'est pas sans importance; un ouvrage sur cette question, rédigé pour le CNRC, paraîtra bientôt.

Alors que les lignes directrices énoncées ci-dessus conviennent bien aux modalités ordinaires de la construction des maisons, il demeure important d'examiner les nouvelles idées et d'en évaluer le potentiel d'économie

d'énergie. Le Programme d'énergie solaire s'est appuyé avec succès sur le Manuel de monitoring de niveau B pour l'évaluation de diverses approches solaires passives. Le coût des projets (25 000 $) et les progrès réalisés récemment dans l'équipement d'acquisition des données amènent à conclure à la nécessité d'une modification de l'approche. Le nouvel équipement permet d'accélérer considérablement l'analyse en fournissant une liaison immédiate des données avec des systèmes de programmation polyvalents. La nouvelle méthodologie de monitoring pourrait faire appel à cette capacité pour définir les principales caractéristiques du bâtiment pendant une période d'un mois, puis recourir à des appareils de mesure et à l'information reçue des utilisateurs pour vérifier la performance prévue de la maison.

On a procédé à des études spéciales visant à évaluer le potentiel des solutions passives appliquées à différents types de bâtiments. Les études menées dans le secteur non résidentiel montrent clairement que de nouvelles mesures marquées par l'efficacité énergétique peuvent améliorer de façon significative les performances dans ce secteur, même si les contributions solaires passives elles-mêmes demeurent très modestes. Les architectes peuvent puiser dans certains documents qui sont maintenant à leur disposition l'information voulue pour la conception d'éléments populaires tels que les atriums et pour l'apprentissage de nouvelles façons d'utiliser des outils perfectionnés comme le DOE2.1B pour les études de simulation.

Comme le secteur privé, partout en Amérique du Nord, répondait au besoin de logiciels simples pour la conception de systèmes solaires passifs en habitation, le rôle du Programme d'énergie solaire devient celui de parrainer l'évaluation de ces logiciels. Les commentaires fournis aux organisations ont été appréciés et on remarque déjà des améliorations aussi bien de la précision que de la facilité d'utilisation des programmes.

Un logiciel canadien, ENERPASS, a permis de réaliser l'efficacité énergétique dans la conception d'un immeuble d'habitation en copropriété. Toute une série de solutions économiquement valables ont été identifiées et incorporées dans le bâtiment. Le triple vitrage est économiquement valable, même avant que l'on prenne directement en considération l'économie d'énergie, parce qu'il élimine la nécessité de plinthes chauffantes sous les fenêtres. Un système de thermopompe d'origine californienne (figure 16) permet le transport de la chaleur des zones où elle est en excès vers les zones où il en manque. On a aussi utilisé des éléments comme le préchauffage de l'eau chaude domestique, le chauffage des piscines par thermopompe, la récupération de la chaleur de l'air évacué, la ventilation à deux vitesses, le stockage de chaleur pour utilisation nocturne de l'électricité (moins chère) et un type de garage permettant l'économie d'énergie. Le résultat final est illustré à la figure 17. La consommation d'énergie par unité de superficie de plancher est environ le tiers de celle d'une copropriété traditionnelle.

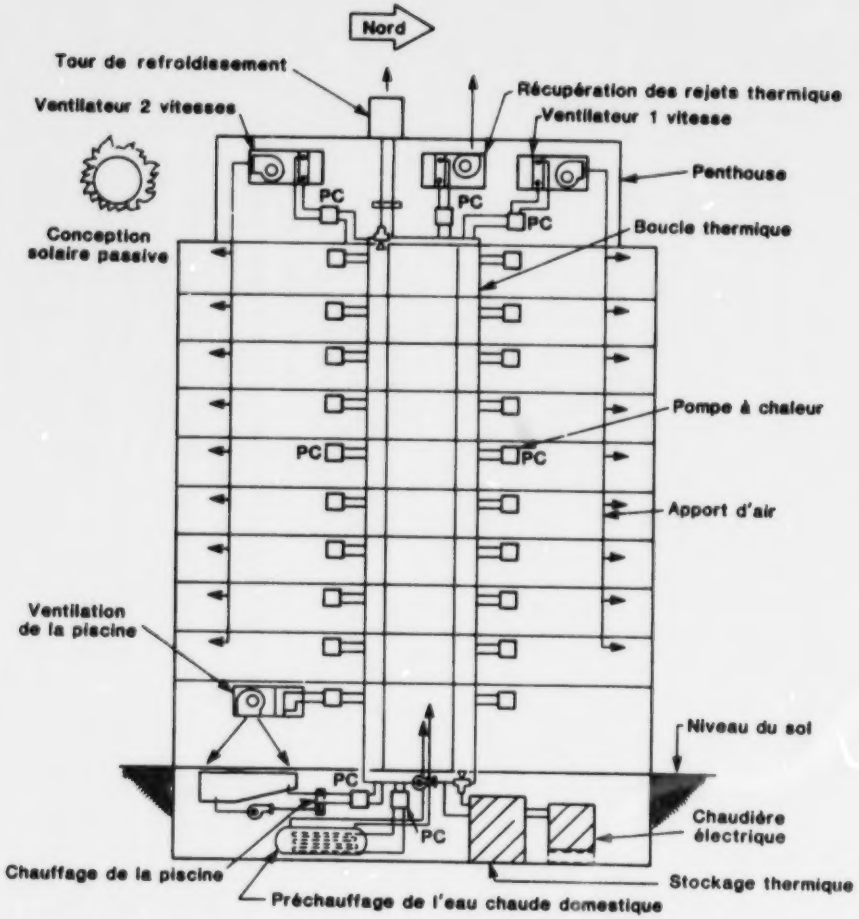


Figure 16. Schéma d'un système californien de thermopompage pour un immeuble en copropriété (d'après une figure parue dans "Passive Solar Hybrid Design for a Low Energy Apartment Building, Project Digest" de la Engineering Interface Limited, avril 1984).

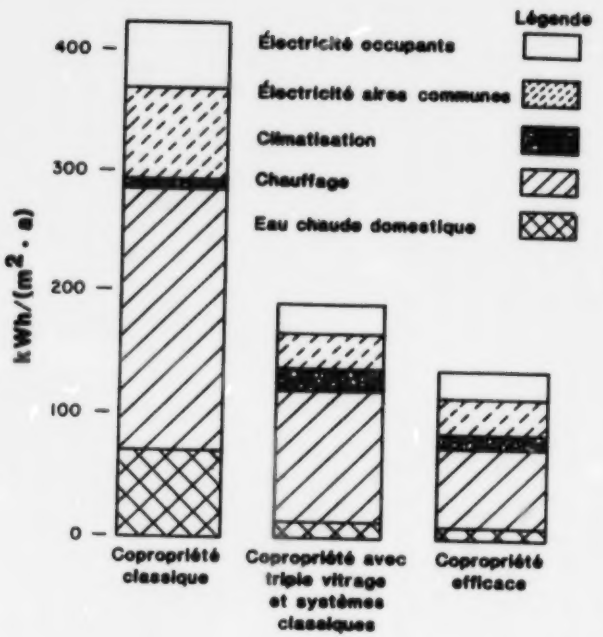


Figure 17. Rendements énergétiques d'immeubles en copropriété classique et efficace (d'après une figure parue dans "Passive Solar Hybrid Design for a Low Energy Apartment Building, Project Digest" de la Engineering Interface Limited, avril 1984).

4.2.2 Programme de la superfenêtre

L'amélioration de la performance thermique des fenêtres constitue l'un des plus importants défis de la recherche de l'efficacité énergétique en habitation. La fenêtre ordinaire à double vitrage a une résistance thermique d'environ 0,35 ($m^2 \cdot °C$)/W, performance de 6 à 15 fois inférieure à celle de murs qui l'entourent. Dans les petites pièces, des fenêtres orientées au sud donnent un gain net de chaleur mais des pièces plus grandes désavantagent le solaire passif en raison des soins spéciaux qu'il faut apporter pour éviter les larges écarts de température jour-nuit. La fenêtre traditionnelle exige également un bon système de distribution de la chaleur pour compenser l'inconfort dû à l'effet de refroidissement. Dans les nouvelles maisons surisolées, la fenestration contribue à 30 % de la déperdition thermique totale. La superfenêtre à haute performance demeure un des secteurs principaux de la recherche solaire passive au Canada.

L'identification des facteurs qui ont un effet important sur la performance d'une fenêtre est une des principales préoccupations des chercheurs. Le logiciel de simulation VISION a rendu possible l'évaluation d'à peu près n'importe quelle configuration présentant de l'intérêt. Ce logiciel se fonde sur des équations précises pour le calcul de la transmission thermique et optique des vitrages. La figure 18 montre les comportements comparés de divers espacements des vitrages dans des fenêtres à vitrage triple dotées d'un revêtement à faible émissivité qui réduit la transmission de l'infrarouge. Lorsque l'espacement est très petit, c'est la conduction par l'air qui est l'élément majeur de la transmission de chaleur. A 10 mm, environ, la convection devient un facteur de transmission important, de telle sorte que l'amélioration de résistance que l'on peut réaliser au-delà de ce point est faible.

La figure 19 montre l'importance du revêtement à faible émissivité. Le verre absorbe très bien l'infrarouge; à chaque interface du verre, le rayonnement thermique est absorbé et ré-émis. Le film de FEP (nom commercial : Teflon, propriété de I.E. duPont de Nemours and Co.) a une bonne transmissivité dans l'infrarouge et n'oppose donc aucune barrière à la transmission thermique par rayonnement. La figure montre à quel point cette transmission est faible lorsque le revêtement à faible émissivité de l'un des vitrages supprime le rayonnement infrarouge. Elle met aussi en évidence le potentiel offert par des combinaisons de verres extérieurs avec des polymères en pellicule mince intérieure.

On a entrepris divers projets visant à résoudre les problèmes pratiques reliés à la conception de la superfenêtre. Il existe sur le marché des revêtements à faible émissivité mais ils sont généralement coûteux et on s'interroge sur leur durabilité. Un groupe a mis au point une technique

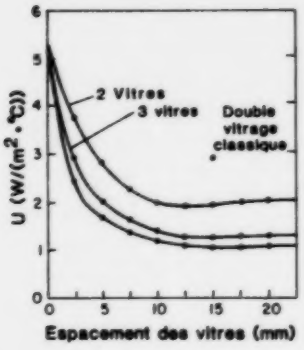


Figure 18. Transfert de la chaleur à travers un vitrage multiple, pour différents espacements (d'après la figure 1, J.L. Wright, "The Computer Simulation of Super Window Glazing Systems which Incorporate Teflon (FEP) Inner Glazings", Actes d'Intersol 85, juin 1985).

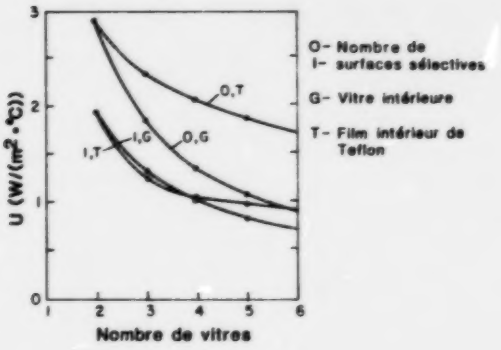


Figure 19. Transfert de la chaleur à travers un vitrage multiple, pour différentes options (d'après la figure 2, J.L. Wright,, "The Computer Simulation of Super Window Glazing Systems which Incorporate Teflon (FEP) Inner Glazings", Actes d'Intersol 85, juin 1985).

très prometteuse de dépôt de vapeur chimique pour l'application d'un revêtement à faible émissivité sur le verre. D'autres techniques n'ont pu parvenir à assurer l'uniformité d'épaisseur du revêtement. Une vaporisation à charge électrostatique a permis de résoudre le problème, la répulsion électrique empêchant les gouttelettes de s'agglomérer entre elles.

Un autre procédé de revêtement à faible émissivité, cette fois sur polymère en film mince, s'est révéré prometteur pour les essais en vraie grandeur et même pour la commercialisation. Le procédé comporte une machine nouvelle à crachotement à magnétron biplanaire et un dépôt réactif. On peut utiliser toute une gamme de matériaux de revêtement; plusieurs offrent d'excellentes caractéristiques de durabilité.

On a procédé à diverses études menant à la conception de configurations pratiques de fenêtres épaisses. A mesure que la séparation des vitres augmente, le volume de gaz emprisonné s'accroît. Avec les variations de la température le plus grand volume de gaz mène à les forces de flexion considérable. C'est seulement depuis peu que l'on peut disposer de fenêtres à triple vitrage offrant une fiabilité élevée et susceptibles de résister au bris pendant plusieurs années. Le vitrage quadruple pousse à leurs limites les connaissances techniques actuelles. La compensation de la pression n'a pas reçu de solution facile dans le programme passif canadien mais les recherches ont permis d'accumuler des données. Les chercheurs qui tenteront de trouver des solutions disposent d'une information solide.

La fenêtre "définitive" aurait un double vitrage comportant un revêtement à très faible émissivité pour supprimer la transmission par rayonnement dans

l'infrarouge; d'autre part, l'espace entre les vitrages serait sous vide, de façon à éliminer la transmission par conduction et par convection. L'écrasante pression exercée par l'atmosphère sur la feuille de verre oppose un obstacle majeur à la mise en pratique de cette idée. Il existe un projet canadien qui montre que la production d'une telle fenêtre est au moins techniquement réalisable. Elle n'a pas d'attrait économique pour le moment car elle fait appel à du verre trempé de 6 mm. Un élément de cette étude, soit un procédé supérieur de scellement des bordures, a reçu un accueil sérieux de l'industrie. Il consiste en une bande métallique flexible fixée directement à la bordure du verre.

En même temps que la technologie de la superfenêtre, il est important d'étudier les moyens d'exploiter pleinement dans l'industrie du bâtiment les progrès réalisés. De la même façon que la fenêtre à triple vitrage a permis de simplifier le système de distribution de chaleur de l'immeuble d'habitation de la figure 16, on peut prévoir que la superfenêtre permettra des réductions des coûts de chauffage.

4.3 L'économique du solaire passif au Canada

4.3.1 Analyse économique du solaire passif actuel

Il a été établi ci-dessus que, dans l'état actuel de la technologie et compte tenu des contraintes en matière de coût, le solaire passif ne peut que mettre l'accent sur une fenestration orientée au sud, sans accroissement de superficie au-delà de ce qui est esthétiquement désirable. D'un point de vue économique, la première question que l'on doit se poser est celle-ci : les gains passifs valent-ils la peine d'être recherchés? Les gains d'énergie varient selon la partie du Canada où l'on se trouve, mais Ottawa, en raison de sa position intermédiaire entre les climats continental et maritime, fournit une bonne indication de ce que l'on peut obtenir. Les chiffres donnés ci-dessous sont basés sur le climat d'Ottawa.

Pour un superficie nette de 1 m^2 de vitrage double, il y a une différence de 0,9 GJ/a de gain entre une fenêtre orientée au sud et une fenêtre orientée au nord (figure 20). A raison de 0,045 \$/kWh, ou 12,5 \$/GJ, on obtient une économie de 11 \$/m^2. Avec 10-20 m^2 de vitrage adaptable à une localisation au sud dans une maison, le bénéfice global, non-négligeable, est de l'ordre de 110 à 220 \$/a. La performance des fenêtres de l'est et de l'ouest, sur toute la saison de chauffage, est intermédiaire entre celle des fenêtres du nord et du sud. L'été, cependant, les gains solaires des fenêtres orientées à l'est et à l'ouest sont maximaux et sont moins faciles à réduire au moyen d'avancées. Pour cette raison, la superficie des fenêtres sur les faces est et, spécialement, ouest doit demeurer minimale.

L'addition de fenêtres orientées au sud au-delà de ce qui est esthétiquement désirable peut-il se justifier du point de vue des économies à réaliser? Remplacer un mur ayant une résistance de 3,5 $m^2 \cdot °C/W$ par une fenêtre ordinaire à double vitrage donnerait un gain net de 0,4 $GJ/(m^2 \cdot a)$ dans la région d'Ottawa si la totalité du gain solaire était utilisable. Ces valeurs tiennent compte de l'effet de pont thermique du bâti et des châssis de la fenêtre, qui n'est pas négligeable (figure 21). Avec un seuil d'efficacité de coût de 120 $\$/(GJ \cdot a^{-1})$, un accroissement de coût de quelque 50 $\$/m^2$ pour la fenêtre serait justifiable. Mais comme les fenêtres coûtent environ 180 $\$/m^2$ et qu'un mur de ce type peut se construire pour 70 $\$/m^2$, un accroissement de la superficie des fenêtres est, même dans les meilleures conditions, difficile à justifier.

Lorsque l'utilisabilité solaire marginale tombe au-dessous de 0,7, la performance énergétique du mur devient meilleure que celle de la fenêtre. La figure 21 montre que les dimensions de la fenêtre sont encore modestes lorsque l'on atteint ce point dans une construction à ossature de bois typique. Une superficie optimale de fenestration, du point de vue de l'économie d'énergie, est bien en deçà de ce qui est habituellement jugé désirable du point de vue de l'éclairage et de l'habitabilité.

De toute évidence, le passif solaire ne peut faire que peu de progrès sans amélioration importante de la technologie de la fenêtre, aussi bien dans le commercial que dans le résidentiel, encore que, comme on l'a vu, l'efficacité de coût de la fenêtre à triple vitrage soit réalisable dans le secteur de l'immeuble d'habitation de type copropriété. Les petites dimensions du

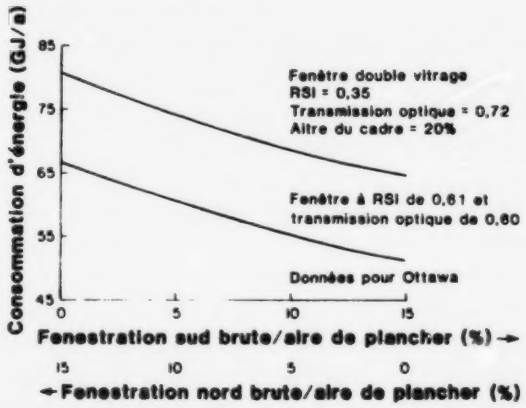


Figure 20. Variation de la consommation d'énergie d'une maison en fonction de l'orientation des fenêtres (d'après un récent travail à forfait exécuté pour le CNRC par S. Carpenter d'Enermodal).

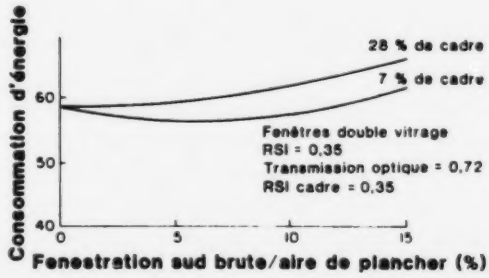


Figure 21. Consommation d'énergie en fonction de la fenestration sud, pour fenêtres à double vitrage et pour deux rapports vitrage/cadre (d'après un récent travail à forfait exécuté pour le CNRC par S. Carpenter d'Enermodal).

marché actuel de la fenêtre supérieure et de la technologie qui y est appliquée en ont maintenu le prix à des niveaux qui en découragent l'achat. Mais des percées ont lieu en ce moment aux Etats-Unis, d'où une expansion rapide du marché de la fenêtre à double vitrage et à faible émissivité. Cette voie est encore plus logique pour le climat canadien.

4.3.2 Aspects économiques du potentiel de développement du solaire passif au Canada

La figure 22 fait voir la performance énergétique de diverses fenêtres de conception avancée, ce qui permet d'en évaluer le potentiel. A la figure 23, on a calculé le supplément de coût justifiable par rapport à une fenêtre à double vitrage en faisant la moyenne des gains solaires sud et nord, qu'on multiplie ensuite par le seuil d'efficacité de coût de 120 $/(GJ•a^{-1}). Etant donné ces coût cibles, la plupart de ces solutions apparaissent comme éminemment réalistes. Cela est encore plus facile à comprendre si l'on considère que le coût actuel du vitrage double scellé ne représente que 15-20 % du coût total de la fenêtre traditionnelle. Le coût se trouvant maintenant en très grande partie concentré dans le cadre et les

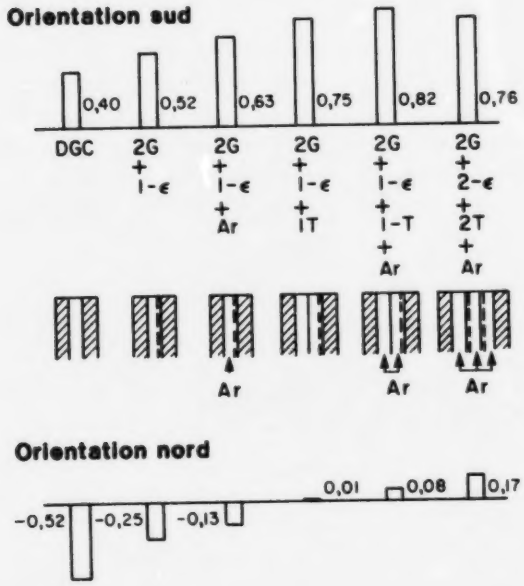
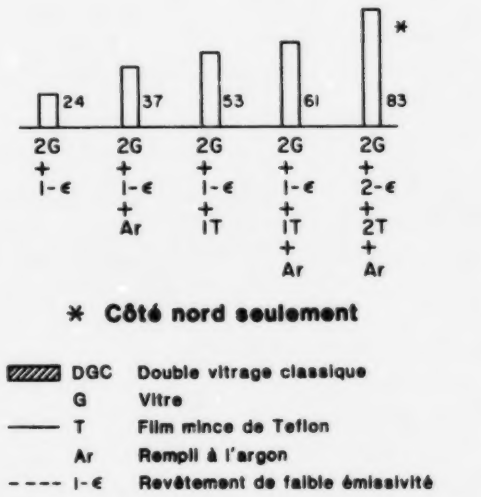


Figure 22. Bilan énergétique net pour différents types de vitrage à Ottawa (un nouveau travail basé sur le programme VISION de S.L. Wright et une méthode proposée par S.J. Harrison et S.A. Barakat dans "A Method for Comparing the Thermal Performance of Windows", ASHRAE Trans, 89(IA) : 3-11; 1983).



La dernière conception est de résistance thermique de 1,7 m^2 • °C/W

Figure 23. Supplément de coût justifiable pour différents types de vitrage à Ottawa.

châssis de la fenêtre, l'amélioration de la performance de ces composants a un grand potentiel de rentabilité. En un mot, il s'agit là d'un champ de développement très prometteur.

Les superfenêtres susciteront l'intérêt du consommateur en raison du fait que, sans accroître la facture énergétique, elles mettent au service du concepteur des possibilités nouvelles d'addition d'espaces attrayants et bien éclairés. Elles permettront de créer en hiver des conditions plus saines, par le maintien d'un niveau hygrométrique élevé, sans risque de condensation sur les fenêtres. Dans le cas des immeubles commerciaux, la superfenêtre a l'important avantage d'éliminer le besoin du coûteux chauffage périphérique et de permettre de donner aux bâtiments la populaire allure "tout verre" sans contrepartie énergétique négative.

L'impact de la nouvelle fenêtre sur la situation énergétique canadienne sera aussi très positif. Par le renforcement du chaînon faible de la résistance thermique qui s'exerce à la périphérie du bâtiment, on réduit de façon substantielle la charge énergétique totale et la charge de pointe (figure 24). En conséquence, les fenêtres ont un créd t élevé en matière de capacité, c'est-à-dire que non seulement il y a réduction de la consommation de combustible mais encore on peut réduire la capacité réelle de production d'énergie (ou plus exactement, dans le contexte canadien, on peut utiliser plus efficacement la capacité électrique actuelle). La superfenêtre rend aussi plus économique et plus pratique la gestion des autres charges. Par exemple, il devient beaucoup plus simple d'avoir un réservoir d'eau chaude et un réservoir de stockage combinés, ce qui permet de satisfaire tous les besoins de chauffage de locaux pendant la nuit, au

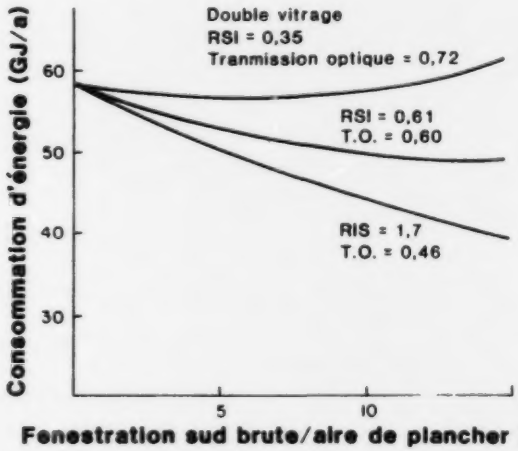


Figure 24. Effet de la résistance thermique de la fenestration sud sur la consommation d'énergie d'un immeuble (d'après un récent travail à forfait exécuté pour le CNRC par S. Carpenter d'Enermodal).

coût de la période de faible demande. Certaines des plus récentes stratégies totales d'amélioration de la gestion de l'énergie, pour le secteur de la maison, incluent la fenêtre à ventilation avec récupération de chaleur, l'évacuation centrale d'air avec récupération par thermopompe pour l'approvisionnement en eau chaude et un système de chauffage par rayonnement qui réduit la déperdition thermique totale sans perte de confort tout en assurant une bonne alimentation en air frais.

5. LE PHOTOVOLTAÏQUE

5.1 Le photovoltaïque dans la perspective internationale

La technologie photovoltaïque (PV) a pour objet la conversion du rayonnement solaire en électricité. Celle-ci étant une énergie de catégorie supérieure et diversifiée dans ses applications, le PV est la plus intéressante des voies d'utilisation de l'énergie solaire en matière de remplacement des combustibles fossiles. Les applications actuelles comprennent l'alimentation en énergie des relais de communication, de l'équipement de monitoring, des aides à la navigation et d'autres accessoires placés dans des endroits éloignés, là où la rentabilité du solaire est attribuable à l'avantage concurrentiel direct non pas sur le coût des combustibles courants mais sur le coût du transport du combustible jusqu'à l'emplacement. Les calculatrices, les montres-bracelets et d'autres accessoires du même genre constituent aussi un marché considérable, auquel s'intéresse spécialement l'industrie japonaise.

Le marché du photovoltaïque a crû de façon exponentielle depuis 1974 : les prix sont dix fois moindres (figures 25 et 26). Il devrait continuer son expansion, mais à un rythme décroissant d'année en année. Les marchés les plus nouveaux, tels ceux de l'éclairage à distance, de la protection cathodique et du pompage de l'eau devraient remplacer certains de ceux qui sont saturés, le prix des modules baissant, de 8 $\$/W_p$ qu'ils sont actuellement, à 3-4 $\$/W_p$ en 1990.[2]

Pour le pompage et pour l'alimentation des villages en énergie, la compétition directe avec les groupes électrogènes diesel devient de plus en plus importante. La compétitivité du PV est liée à la réduction du coût non seulement des cellules PV mais aussi des piles, des inverseurs et des régulateurs, ainsi qu'à l'évolution du prix mondial du pétrole.

---

[2]La capacité de production d'une cellule solaire dans des conditions idéales (rayonnement solaire maximal à incidence normale) est donnée en watts de pointe (W_p). Le rayonnement solaire maximum étant évalué à 1 kWh/m^2, le prix d'un module de 8 $\$/W_p$ serait, à 10 % d'efficacité, de 800 $\$/m^2$. La production moyenne, sur une longue période, est de 6 à 10 fois inférieure à ce maximum, selon le climat. Par conséquent, le coût de la production continue d'une puissance de 1 W par ce module serait d'environ 64 $, plus le coût des piles, du régulateur de tension, etc. Le coût de l'alimentation d'une lampe de navigation de 20 W serait de $(8\ W_p/W_{cont})(8\ \$/W_p)(20\ W_{cont})$ = 1280 $, plus les piles et le régulateur. Avec l'électricité ordinaire, le coût annuel, à 0,10 $/kWh, serait :

$$(0{,}10\ \$/kWh)(0{,}02\ kWh)(24\ h/d)(365\ d/a) = 17{,}52\ \$/a$$

Pour une bonne application du PV dans ce domaine l'extension du réseau d'électricité doit être très coûteuse ou peu pratique.

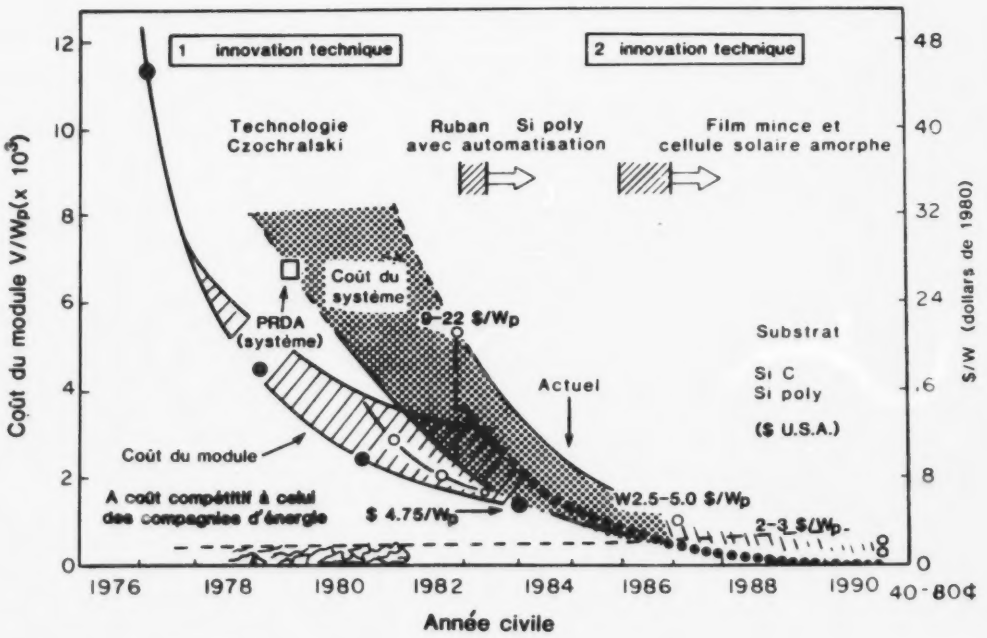


Figure 25. Évolution du coût des modules photovoltaïques (d'après une figure de Y. Hamakawa parue dans "Recent Advances in Amorphous Silicon Solar Cells and Their Technologies", Actes d'Intersol 85, juin 1985).

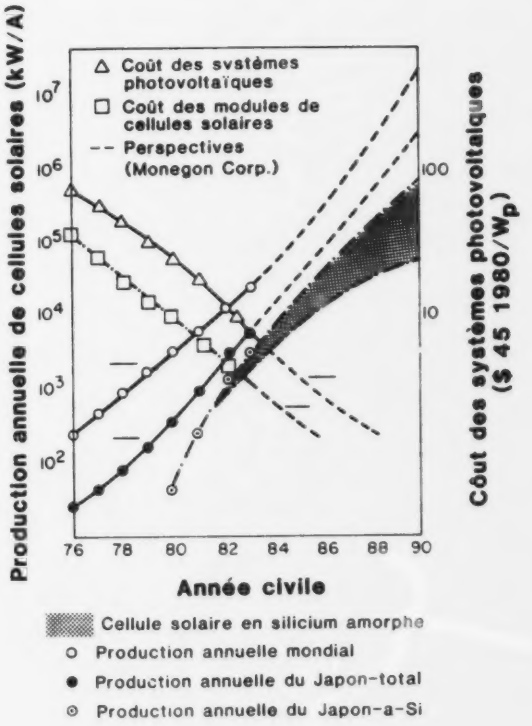


Figure 26. Évolution de la production des modules photo- voltaïques (d'après une figure de Y. Hamakawa paru dans "Recent Advances in Amorphous Silicon Solar Cells and Their Technologies", Actes d'Intersol 85, juin 1985).

Le marché éventuel de la cellule solaire reliée au réseau dépend de la réduction du coût de la cellule même et des autres composants du système, de même que de l'amélioration de la performance de la cellule. La tableau 2 donne les objectifs des Etats-Unis devant assurer la rentabilité de cette application à la fin des années 1990. Ces objectifs pourraient conduire à un coût global de 0,065 $/kWh en dollars américains constants de 1982.

Ces coûts cibles constituent un défi considérable. On croit savoir que les technologies actuelles de la pellicule épaisse utilisant du silicium cristallin hautement purifié sont limitées par le coût élevé des matériaux. Le film mince et la multijonction sont les voies de recherche les plus susceptibles de conduire aux buts visés. Une grande partie des progrès dont on a besoin demeure toutefois au niveau de la recherche fondamentale. Par exemple, une des plus grande réalisations de la dernière année consiste dans une amélioration de la compréhension de la dégradation, sous l'action de la lumière, du silicium amorphe passivé par de l'hydrogène. La résolution de ce problème de durabilité associé au silicium amorphe est critique pour le développement de cette voie technologique. Selon les plus récents rapports, on aurait atteint une durabilité élevée dans une cellule triple à pellicule mince de silicium amorphe fluoré.

La recherche en PV est coûteuse et présente des risques; un degré élevé de soutien gouvernemental est essentiel au maintien du rythme actuel aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Plusieurs voies vers le succès (ou l'échec) restent à parcourir. Un progrès important enregistré dans un secteur peut rendre désuète une technologie tout juste mise au point à grands frais dans un autre secteur. L'entreprise privée participe à tous les programmes de façon importante; de leur côté, les gouvernements financent une partie de la recherche-développement et assurent une bonne évaluation du travail et l'échange de l'information. Le budget du gouvernement japonais dans le PV (fortement concentré dans la recherche sur le silicium amorphe) était

Tableau 2. Objectifs techniques à long terme du gouvernement fédéral et de l'industrie aux Etats-Unis, en dollars américains constants de 1982

	Systèmes à	
	Plaque plane	Concentrateur
Efficacité du module	13-17 % } 0,4 $/$W_p$	23-29 % } 0,5 $/$W_p$
Coût du module	40-75 $/m^2 }	90-160 $/m^2 }
Coût du reste du système :		
en termes de superficie	50 $/m^2	100 $/m^2
en termes de puissance	150 $/kW	150 $/kW
Expérance de vie du système	30 ans	30 ans

d'environ 44 000 000 $ en 1984; celui des Etats-Unis, de 45 000 000 $. Le programme de recherche des Etats-Unis pour 1984-1988 met fortement l'accent sur la recherche à long terme et à risques élevés, par opposition à la stratégie précédente qui faisait une large place aux projets de démonstration.

5.2 Réalisations canadiennes dans le photovoltaïque

Par le moyen de contrats avec le CNRC, des petites compagnies canadiennes ont pu apporter leur contribution aux efforts faits sur le plan international pour accroître l'efficacité de la cellule solaire et en réduire le coût. Une compagnie s'est attaquée à la production d'une cellule de grande superficie à substrat de silicium monocristallin ou polycrystallin en utilisant la technique de la pyrolyse à pulvérisation pour déposer des couches transparentes d'oxyde de conduction. Le procédé de fabrication était intrinsèquement moins coûteux que les procédés courants utilisés jusque-là. Les revêtements vaporisés d'oxyde servaient à réaliser la jonction active et les contrats électriques étaient exécutés par sérigraphie. Une étude présentée en mai 1984 à la 17^{e} conférence des spécialistes du photovoltaïque de l'IEEE a fait état d'une efficacité moyenne de 14 %.

Une autre compagnie canadienne a annoncé à la même conférence le succès qu'elle avait obtenu dans l'utilisation d'une méthode de fabrication, à coût peu élevé, de substrats de qualité cellule, directement à partir du silicium de catégorie métallurgique. On a utilisé, pour l'amélioration du silicium, un procédé rapide de filtrage, à trois étapes. La poudre raffinée, étendue sur un substrat de graphite (réutilisable), était ensuite soumise à deux balayages par un faisceau électronique, de façon à produire un substrat polycrystallin plat et uni.

La même compagnie a connu aussi un certain succès dans l'assemblage de modules PV en ayant recours à un niveau assez élevé de main-d'oeuvre mais à un investissement léger en capital. Dans les pays à salaires peu élevés, cette combinaison est attrayante et des ventes de lignes d'assemblage complètes ont été réalisées en Inde et en Chine.

Des recherches visant à résoudre quelques-uns des problèmes associés à la dégradation du silicium amorphe sont en cours dans quelques universités. Il n'y a encore eu aucune percée, mais la qualité du travail déjà fait laisse présager une contribution scientifique importante du Canada dans ce domaine.

Comme exemple des projets dans lesquels on a réussi à mettre au point un système total qui pourrait bien constituer une bonne application de l'énergie PV, on peut mentionner un procédé spécial de dessalement par osmose

inversée perfectionné au Canada. Les pompes de récupération d'énergie du système conservent une très grande efficacité dans une large registre de puissances fournies, par opposition à des appareils de type courant qui fonctionnent beaucoup mieux à des tensions et à des courants déterminés. L'appareil canadien est donc particulièrement apte à fonctionner au moyen de cellules solaires. Les résultats d'expériences faites avec le prototype ont confirmé le très grand potentiel d'efficacité de cette configuration. L'analyse a aussi montré que la combinaison de l'énergie photovoltaïque avec des éléments de récupération d'énergie était supérieure, du point de vue économique, à des installations plus traditionnelles de dessalement utilisant le PV.

Le CNRC s'est récemment concentré, dans son programme interne de recherche, sur l'amélioration de l'information fournie aux concepteurs et installateurs quant à la façon d'optimiser la performance des systèmes PV en climat canadien. On s'apprêtait à construire un centre d'expérimentation lorsque l'interruption du programme fut annoncée. On avait cependant déjà commencé à travailler à la simulation de systèmes PV. On a utilisé l'ensemble TRNSYS comme point de départ pour un travail de simulation détaillée heure par heure. On a mis au point un sous-programme grâce auquel on peut prédire la production de courant et de tension d'une unité ou d'un groupe PV en fonction de données météorologiques utilisées telles qu'elles sont communiquées par le Service de l'environnement atmosphérique. On a aussi mis au point d'autres programmes donnant la performance totale de systèmes de pompage d'eau.

Le Centre national d'essai d'équipement solaire (CNEES) a récemment fait l'acquisition d'appareils d'essai de modules PV. A quelques exceptions mineures près, le CNEES peut vérifier la conformité de modules à (a) la spécification MA 2055 de la Garde côtière du Canada, (b) la norme ACNOR F380 sur les modules PV et (c) la spécification d'essai JLP 5101-16l. Des installations servant à faire l'essai de ces systèmes ont été construites au CNEES dans le cadre d'un programme global de systèmes de pompage mus par l'énergie photovoltaïque. L'équipement comprend un trou de forage de 60 m, une source d'énergie, un système d'acquisition de données et de contrôle d'essais ainsi qu'un logiciel de modélisation.

5.3 L'économique du photovoltaïque

Il est évident, d'après la note de la section 5.1, que le photovoltaïque n'est pas sur le point de pouvoir concurrencer, en termes de coût de fonctionnement, dans l'immédiat ou à moyen terme, l'électricité de réseau. Mais il existe des applications rentables de la cellule solaire; la première a été le remplacement de la pile primaire dans les endroits éloignés, les aides à la navigation, les dispositifs de monitoring, les senseurs, les

répéteurs en hyperfréquence. L'utilisation du PV peut faire le nombre de visites en hélicoptère d'une toute les deux semaines à une par année (la location d'un hélicoptère coûte environ 400 $/h) ou faire tomber de 1 an à 10-20 jours la durée de la réserve de piles nécessaire. La Garde côtière canadienne et Environnement Canada, notamment, ont amorcé une vaste conversion de la pile primaire au PV.

Le PV est également compétitif pour les applications éloignées où l'on utilise actuellement des génératrices à combustion externe, fiables, mais peu efficaces pour la conversion de la chaleur en électricité. L'efficacité des génératrices thermoélectriques et des turbines à vapeur à cycle fermé est d'environ 3 %; les génératrices thermomécanique, introduites récemment, atteignent 9 %. L'investissement initial élevé (dans le cas d'une charge continue de 100 W, il en coûterait 6000 $ pour l'achat d'une génératrice thermoélectrique et de 20 000 à 30 000 $ pour chacune des deux autres génératrices), plus les besoins en combustible rendent ces solutions coûteuses et en font la cible d'un déplacement par le PV. La pénétration de marché du PV dans ce secteur dépend davantage de la qualité et de la fiabilité des systèmes PV (y compris les piles) que d'un abaissement substantiel du coût des modules.

Les génératrices à combustion interne à l'essence et au propane ont une efficacité d'environ 10 % et leur coût d'achat est considérablement inférieur à celui des génératrices externes. Mais elles doivent être soumises à un entretien périodique toutes les 100-200 h. Pour les charges intermittentes, elles constituent une excellente solution. Le PV ne peut les concurrencer sur le plan économique au simple point de vue du déplacement du coût du combustible. Le pompage de l'eau est une des premières applications où le PV peut atteindre à la rentabilité par rapport aux installations à essence, mais même dans ce cas on devra utiliser des modules PV de 3 $/$W_p$ et des systèmes optimisés. Les pays du tiers-monde constituent les meilleurs clients potentiels, à moyen terme, sur le marché de la cellule solaire, appelée à supplanter l'appareil à essence à combustion interne en raison de ses exigences moindres en matière d'entretien, avantage important dans ces pays.

La combinaison du PV et de la génératrice à combustion interne peut être efficace au Canada, où l'on recherche une fiabilité élevée et où l'utilisation est assez soutenue, ce qui rend coûteux l'entretien d'une génératrice isolée (p. ex., maisons ou chalets éloignés du réseau d'électricité). Les ventes ont porté sur des ensembles constitués d'un groupe de 280 W_p, d'un système de piles de 2,2 V et 480 Ah, d'un régulateur de charge et d'un inverseur de 1200 W, au coût total de 7300 $ environ. Un générateur est utilisé conjointement avec ce système PV, occasionnellement, lorsque les charges sont élevées, pour égaliser les charges des piles et réduire la dimension exigée des groupes utilisés l'hiver.

Un prolongement du réseau peut coûter de 10 000 $ à 20 000 $ le kilomètre. Pour que le PV soit compétitif, il faut réunir deux conditions : l'emplacement doit être isolé et la charge à satisfaire doit être faible (l'éclairage, par exemple). Les récents développements apportés à un prototype permettent de prévoir, pour un système d'éclairage de 53 W, un coût de 12 500 $, dont 5000 $ pour le modules PV. Même pour une demande aussi faible, il faudrait que l'emplacement soit à quelques kilomètres du réseau pour que le photovoltaïque soit économique.

Dans le cas de charges plus grandes (de 1 à 500 kW) en emplacement éloigné, c'est la génératrice à combustion interne au diesel qui est le concurrent du PV. On peut atteindre une efficacité de 25 % lorsque la taille de la génératrice est bien accordée à l'importance de la charge. En termes de strict déplacement des sources d'énergie, la cellule solaire n'est vraisemblablement pas rentable à moyen terme. Un système diesel mal équilibré peut avoir un rendement aussi faible que 1,6 kWh/L, mais plus communs sont aujourd'hui des rendements de 2 à 2,8 kWh/L. Dans les villages isolés, le coût du combustible varie habituellement de 0,30 à 0,70 $/L; ce n'est que dans de très rares cas qu'il sera supérieur à 1 $/L. Si la cellule solaire produit environ 1,1 kWh/W_p, le coût d'un système PV devrait, sur le strict plan de l'économie de combustible, baisser au-dessous de 3 $/$W_p$ pour être compétitif.

La véritable occasion qui s'offre au photovoltaïque réside dans la réduction des coûts d'entretien et d'utilisation des petits systèmes. Les grands systèmes sont souvent composés d'un ensemble d'appareils de tailles différentes que l'on peut combiner pour adapter la puissance à la charge. Les coûts d'utilisation peuvent être amortis sur une grande base et on réalise des économies d'échelle dans l'utilisation de la main-d'oeuvre.

Le plus récent progrès enregistré dans la gestion de charge pour petit système consiste dans l'utilisation d'un régime de cyclage de charge en vertu duquel l'appareil diesel travaille à pleine capacité pour répondre à la demande et stocker dans la pile une provision d'électricité pouvant durer de six à neuf heures. L'appareil peut ensuite s'arrêter pendant quelques heures et c'est la pile qui répond à la demande. Lorsque la provision a baissé à un certain niveau, l'appareil diesel redémarre et travaille de nouveau à plein régime. Les piles sont une composant très coûteux dans ce système mais celui-ci devient rentable, en raison spécialement de l'amélioration sur le plan de l'entretien. Cela constitue une occasion pour le PV dans la mesure où les piles et le régime de cycle, dont on dispose déjà, rendent totalement utilisable l'énergie des cellules solaires. Si la fiabilité obtenue par la combinaison du PV et de la charge en cycle peut réduire de façon très substantielle les coûts d'entretien et d'utilisation (par exemple visites occasionnelles à la place d'une surveillance à plein temps), alors le PV peut se justifier.

Au Canada, il est peu probable que la cellule solaire utilisée seule remplace les appareils diesel mêmes. Les coûts actuels sont fortement favorables au diesel et on a souvent besoin en hiver de la chaleur produite par les génératrices. Dans les pays du tiers-monde, cependant, il devrait y avoir introduction graduelle de systèmes PV de 1-5 kW, en raison des avantages de leur fiabilité.

6. CONCLUSIONS

Au cours des 20 à 30 prochaines années, c'est l'élément passif du programme de recherche-développement en solaire qui aura l'impact le plus grand sur la demande d'énergie au Canada. Il ne s'agit pas d'un solaire passif qui consisterait, selon un sens restreint du terme, à accroître le gain solaire d'un bâtiment en le dotant de plus de fenêtres. Il faudra au contraire utiliser la même quantité de fenestration que maintenant mais en l'orientant le plus possible au sud et réduire la déperdition thermique des fenêtres en faisant appel à une technologie avancée. Les chiffres que nous avons présentés ci-dessus permettent de déduire que des améliorations de 10-15 GJ/a dans la performance d'une maison sont possibles au moyen d'une orientation appropriée des fenêtres et que la nouvelle technologie de la fenêtre peut apporter une amélioration additionnelle de 10 GJ/a.

Puisque l'on prévoit la mise en chantier de l'ordre de 120 000 à 160 000 maisons par année au cours des 15 prochaines années, on pourra, pour chaque année d'utilisation répandue des nouvelles techniques, réduire la consommation d'énergie de 3 PJ/a. La rénovation offre aussi un marché très substantiel pour la nouvelle fenêtre. Comme on peut estimer que chaque année le volume des ventes de fenêtres, en rénovation, équivaut sensiblement à celui du résidentiel neuf, on peut compter une économie additionnelle de 1 ou 2 PJ/a. Selon le rythme de pénétration de la nouvelle technologie, l'effet global, en matière d'économie d'énergie, devrait, en l'an 2000, se situer entre 100 et 200 PJ.

L'assistance apportée en vertu du programme du CNRC à la coordination, au transfert d'information et à l'évaluation a contribué considérablement aux succès enregistrés à ce jour dans le secteur de la technologie de la nouvelle fenêtre. Grâce à cette infrastructure, les compétences présentes dans les universités, les centres de recherche et les petites compagnies innovatrices ont été en mesure d'axer leur effort de recherche sur les secteurs présentant le meilleur potentiel d'avantages industriels et économiques. La contribution de cette ressource intellectuelle demeure essentielle au succès du programme parce que l'industrie de la fenêtre au Canada est trop fragmentée et ses capacités en matière de recherche-développement trop limitées pour qu'elle puisse elle-même entreprendre la recherche nécessaire. Comme il reste beaucoup de recherche à faire dans le secteur de la fenêtre, il est nécessaire qu'il continue d'exister un programme de coordination et d'évaluation si l'on veut voir se réaliser le potentiel de développement de la superfenêtre au Canada.

L'industrie canadienne du solaire actif a fait des progrès considérables au cours des sept dernières années et ses produits sont maintenant compétitifs sur le marché international. Le présent rapport a néanmoins identifié de

nombreux secteurs où l'on peut s'attendre à des progrès technologiques additionnels dans l'immédiat. L'industrie devra maintenir ses activités de recherche-développement pour demeurer compétitive et développer pleinement ses exportations. On ne doit pas s'attendre, à moyen terme, à ce que la technologie du solaire actif contribue de façon significative à la fourniture d'énergie au Canada, mais est réaliste d'escompter des bénéfices industriels.

Dans le but de favoriser une exploitation plus économique et plus rationnelle de la technologie photovoltaïque, les responsables du programme recherche-développement du CNRC ont récemment décidé de se spécialiser dans l'optimisation des systèmes. L'industrie des communications et de l'énergie, de même que les organismes gouvernementaux tels que la Garde côtière du Canada, exploitent la technologie photovoltaïque dans de bons secteurs d'application mais le progrès a été plus lent qu'il n'aurait fallu, par manque de coordination entre les groupes. Un programme coordonné d'essai et d'analyse de systèmes semble toujours être l'une des contributions les plus logiques que le gouvernement puisse apporter pour assurer le développement du PV et maintenir le Canada en position de profiter de cette filière, prometteuse à long terme, de production d'énergie.

7. SOURCES D'INFORMATION ADDITIONNELLE

Parmi les nombreux périodiques traitant d'énergie solaire, il en existe un qui fournit des vues d'ensemble pragmatiques aux profanes et aux gens d'affaires du secteur solaire. Il s'agit de Solar Age, publié chaque mois par Solar Vision.

Solar Energy : the Journal of Solar Energy Science and Technology est un menseul publié par la Société internationale d'énergie solaire. Les articles portent sur des travaux de recherches menés ici et là dans le monde.

Solar Energy Materials et Solar Cells sont destinés aux spécialistes de ces domaines.

Quelques publications se spécialisent dans les résumés des connaissances actuelles. On trouve dans ce groupe :

- Solar Energy Intelligence Report, publiée chaque semaine par L.A. Eiserer.
- Photovoltaic News, publiée par Paul Maycock.
- Photovoltaic Insider's Report.

Les actes des nombreux colloques sur l'énergie solaire sont une bonne source d'information. Voici quelques-uns de ces colloques :

- Biennal Conference of the International Solar Energy Society. Le dernier, appelé Intersol 85, a eu lieu à Montréal en juin 1985.
- American Society of Mechanical Engineers Solar Energy Division Annual Conference. Les actes sont intitulés "Solar Engineering - 198_."
- American Solar Energy Society Annual Meeting.
- Solar Thermal Research Program Annual Conference. Colloque parrainé par le U.S. Department of Energy et par le Solar Energy Research Institute.
- American Solar Energy Society Annual Passive Solar Conference. Le rapport est intitulé "ASES Proceedings of the __th Passive Solar Conference".
- IEEE Photovoltaic Specialists Conference.
- Photovoltaic Advanced Research and Development Review Meeting. Colloque parrainé par le U.S. Department of Energy et par le Solar Energy Research Institute.
- Symposium on Materials and New Processing Technologies for Photovoltaics. Rencontre parrainée par l'Electrochemical Society.

Les sources d'information canadiennes comprennent :

- SOL, magazine bimestriel publié par la société canadienne d'énergie solaire inc. Les responsables du programme de développement de l'énergie solaire à EMR ont choisi cette publication comme véhicule d'une bonne partie de l'information sur leurs activités.

- Solar Energy Program Contract Registry. Le volume 1984-86 sera le dernier que publiera le CNRC mais EMR publiera désormais un rapport similaire.

- Solplan Review. Publication bimestrielle de The Drawing-Room Graphic Services Ltd., qui met l'accent sur l'efficacité énergétique dans les détails de construction et présente une chronique régulière du Low Energy Building Council (LEBCO).

- Proceedings of the Annual National Conference of the Solar Energy Society of Canada. La rencontre de 1985 s'est tenue conjointement avec l'ISES sous le nom d'Intersol 85. La rencontre précédente avait eu lieu à Calgary (SESCI '84).

7.1 La ressource solaire

On dispose au Canada de données solaires pour 129 emplacements répartis par tout le pays, sous forme de tables imprimées, ou stockées sur ruban magnétique neuf-pistes ou sur disque souple. Les données stockées comprennent également les valeurs horaires de la température de l'air, de l'humidité, de la vitesse et de la direction du vent. Renseignements sur ces données, la façon de se les procurer, leur coût :

Division des services climatologiques
Service de l'environnement atmosphérique
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4

Rubans : Mike Webb au (416) 667-4953.
Tables : Bernie Yorke au (416) 667-4614.

Les principaux ouvrages qui existent sont les suivants :

- Solar Radiation Data Analyses for Canada, 1967-76.
  - Volume 1. The Atlantic Provinces (30 $)
  - Volume 2. Québec (24 $)
  - Volume 3. Ontario (30 $)
  - Volume 4. The Prairies Provinces (36 $)
  - Volume 5. British Columbia (30 $)
  - Volume 6. The Yukon and the North West Territories (18 $)

Un rapport rédigé pour le Task IV, Solar Heating and Cooling Programme de L'IEA contient une vue d'ensemble de la méthodologie des mesures solaires. Il s'intitule :

- An Introduction to Meteorological Measurements and Data Handling for Solar Energy Applications. Octobre 1980, DOE/ER-0084.

Les rapports et articles de recherche suivants sont eux-mêmes des vues d'ensemble :

- Davies, J.A., 1981 : Models for Estimating Incoming Solar Irradiance. Canadian Climate Centre Report No. 81-2, Atmospheric Environment Service, Downsview (Ontario).

- Siurna, D.S., D'Andrea, L.J., and Hollands, K.G.T., 1984 : A Canadian Representative Meteorological Year for Solar Systems Simulation. SESCI '84 Calgary Proceedings, pp. 85-88.

- Hay, J.E., and McKay, D.C., 1985 : Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces : A Review and Assessment of Methodologies. Solar Energy, 3 (4-5), pp. 203-240.

John Hay prépare également une monographie sur le rayonnement solaire au Canada pour le Service de l'environement atmosphérique, publication qui devrait paraître dans la seconde moitié de 1986.

7.2 Technologie du solaire actif

Plusieurs des bonnes sources sur la technologie du solaire actif peuvent être évaluées par le truchement du registre des contrats et des autres publications mentionnées ci-dessus. Voici l'une des sources du contenu international du présent document :

- Hardacre, A.G., Blum, S.B., and Terrenti, R., 1984 : Solar Energy Research Outside Sweden, Sweden Council for Building Research Document D22 : 1984.

Les adresses suivantes au Canada peuvent être utiles pour la poursuite d'études sur le solaire actif :

Programme de développement de l'énergie solaire
Energie, Mines et Ressources Canada
460, rue O'Connor, pièce 426
Ottawa (Ontario)
K1A 0E4 (613) 995-9447

Canadian Solar Industries Association Inc.
67A, rue Sparks
Ottawa (Ontario)
K1P 5A5 (613) 237-7000

Renseignements sur le programme de simulation solaire WATSUN :

Watsun User Service
University of Waterloo
Waterloo (Ontario)
N2L 3G1 (519) 885-6160

7.3 Technologie du solaire passif

Parmi les publications de l'Institut de recherche en construction (IRC) du CNRC, les trois suivantes permettent d'évaluer les gains solaires dans une simple maison à gain direct par voie passive :

- Barakat, S.A., et Sander, D.M., 1982 : Utilization of Solar Gains Through Windows for Heating Houses, Building Research Note 184.

- Barakat, S.A., et Sander, D.M., 1982 : A Simple Method for Determining the Heating Requirements of Direct-Gain Passive Solar Houses, Building Research Note 195.

- Barakat, S.A., 1980 : Solar Heat Gains Through Windows in Canada, DBR Paper No. 944, NRCC 18674.

(Lorsqu'on applique aux deux premiers documents cités ci-dessus les données sur la contribution des fenêtres au gain de chaleur contenues dans le troisième, il est important de noter qu'elles se rapportent à la superficie de vitrage uniquement. Si l'on veut tenir compte des cadres, on doit en soustraire la superficie de la superficie totale de la fenêtre, ce qui donne la superficie de vitrage nette. On doit ensuite soustraire du gain (ou de la perte) de chaleur attribuable au vitrage la perte additionnelle attribuable au bâti; voir la figure 21 du présent document).

On peut se procurer à l'adresse suivante le programme d'analyse énergétique HOTCAN :

Energy Analysis Software
C.P. 7081
Succursale postal J
Ottawa, (Ontario)
K2A 3Z6 (613) 722-5091

Le programme HOT-2000, version améliorée de HOTCAN, devrait être mis sur le marché en octobre.

On peut se procurer à l'adresse suivante le programme ENERPASS, programme de simulation permettant l'analyse de la performance énergétique d'une maison solaire passive :

Enermodal Engineering Ltd.
368, rue Phillip, Unité 2
Waterloo (Ontario)
N2L 5J1 (519) 884-6421

L'adresse suivante n'est pas seulement celle de SESCI, mais aussi celle de LEBCO (The Low-Energy Building Corporation) :

SESCI
135, rue York, Suite 206
Ottawa (Ontario)
K1N 5T4 (613) 236-4594

On peut également se procurer à l'adresse d'EMR donnée ci-dessus de l'information sur le programme passif.

Les deux publications suivantes ont servi, dans le présent document, à l'analyse de la performance des fenêtres :

- Harrison, S.J., et Barakat, S.A., 1983 : A Method for Comparing the Thermal Performance of Windows, ASHRAE Transactions, Vol. 89, Part 1A, pp. 3-11.

- Wright, J.L., et Ferguson, J.E., 1984 : VISION : A Computer Program to Evaluate the Thermal Performance of Super Windows. Passive-10, Programme d'énergie solaire, CNRC.

7.4 Technologie du photovoltaïque

On peut se tenir au courant des développements survenant dans le programme des Etats-Unis dans le domaine du photovoltaïque au moyen des mises à jour périodiques publiées en rapport avec le plan quinquennal annoncé en 1983. Le document original s'institule :

- Five-Year Research Plan, 1984-1988, Photovoltaics : Electricity from Sunlight, by the Photovoltaic Energy Technology Division, Office of Solar Electric Technologies, U.S. Department of Energy, DOE/CE-0072.

On peut trouver dans la base de données NTIS les documents récents de ce programme.

Les documents suivants peuvent servir à l'évaluation de la situation au Canada :

- Assessment of the Canadian Market for Photovoltaic Power System. The Techno-Economic Research Unit Limited, Ontario Ministry of Energy, 1984.

- Overview and Assessment of Photovoltaic Technical, Industry and Market Development Opportunities. Spectral Engineering Ltd. et al., Ontario Ministry of Energy, 1983.

- Photovoltaic Technology Overview, by Spectral Engineering Ltd. Programme d'énergie solaire, CNRC, NRC, 1986. On peut emprunter ce document en s'adressant à l'ICIST.

On peut lire un historique du sous-programme PV du Programme d'énergie solaire dans :

- SEP Photovoltaics Program Review, by the Photovoltaic Sub-program, SEP, NRC, 1985. On peut emprunter ce document en s'adressant à l'ICIST.

On peut obtenir de l'information sur le programme photovoltaïque du Canada en s'adressant aux responsables du Programme de développement de l'énergie solaire du ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources.